

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Mikulić

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Ivan Mikulić

Zagreb, 2014.

ZAHVALA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Ivici Garašiću, koji me korisnim savjetima vodio tijekom izrade ovog rada.

Hvala dr. sc. Tanji Tomić na vodstvu i savjetima koji su svakako dali svoj doprinos kvaliteti ovog rada.

Zahvaljujem se i laborantima Batinić Zdenku, Šokičić Mati te Sukobljević Krešimiru na pomoći i strpljenju pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Za kraj, posebna zahvala mojoj majci Andreii te djevojci Katji koje su mi pružile punu podršku tijekom cijelog studija.

Ivan Mikulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK RADA	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
2. PODVODNO ZAVARIVANJE	3
2.1. SUHO PODVODNO ZAVARIVANJE.....	3
2.1.1. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj komori	4
2.1.2. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj mini-komori	11
2.1.3. Atmosfersko podvodno zavarivanje	12
2.1.3.1. Atmosfersko podvodno zavarivanje u nepropusnim komorama.....	12
2.1.3.2. Atmosfersko podvodno zavarivanje u koferdamu.....	12
2.1.4. Lokalno suho podvodno zavarivanje	14
2.2. MOKRO PODVODNO ZAVARIVANJE.....	15
2.2.1. Povijesni razvoj postupka	16
2.2.2. Mokro podvodno zavarivanje REL-postupkom zavarivanja	17
2.2.2.1. Osnovne tehnike rada	20
2.2.2.2. Dodatni materijali.....	23
2.2.2.3. Oprema.....	27
2.2.3. Mokro podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom.....	31
2.2.3.1. Općenito o zavarivanju praškom punjenom žicom.....	31
2.2.3.2. Vrste FCAW postupka zavarivanja	32
2.2.3.2.1. FCAW-S postupak zavarivanja	32
2.2.3.2.2. FCAW-G postupak zavarivanja.....	33
2.2.3.3. Izvedba FCAW-a za mokro podvodno zavarivanje.....	35
2.2.4. Greške i problemi pri mokrom podvodnom zavarivanju	39
2.2.5. Utjecaj parametara zavarivanja na udio difundiranog vodika u zavarenom spoju	44
2.2.6. Primjena mokrog podvodnog zavarivanja.....	46
2.3. KLASA ZAVARA U PODVODNOM ZAVARIVANJU PREMA AWS D3.6	48
3. ČELICI POVIŠENE ČVRSTOĆE	49

3.1.	OPĆENITO O ČELICIMA POVIŠENE ČVRSTOĆE	49
3.2.	PROIZVODNJA ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE	51
3.2.1.	<i>Predgrijavanje</i>	51
3.2.2.	<i>Grubo mehaničko valjanje</i>	51
3.2.3.	<i>Završno termomehaničko valjanje</i>	52
3.2.4.	<i>Snažna redukcija debljine lima</i>	52
3.2.5.	<i>Režim hlađenja</i>	52
3.2.6.	<i>Temperatura namatanja</i>	52
3.3.	RAZVOJ ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE API 5L X80	53
3.4.	PROBLEMATIKA ZAVARIVANJA VISOKOČVRSTIH ČELIKA U INDUSTRIJI	56
3.5.	SPECIFIČNI POSTUPCI ZA ZAVARIVANJE CJEVOVODA	57
3.6.	RAZVOJ MOKROG PODVODNOG ZAVARIVANJA ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE	58
3.7.	ZAVARLJIVOST ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE MOKRIM PODVODNIM ZAVARIVANJEM	59
3.7.1.	<i>Analitički pristup i procjena zavarljivosti čelika API 5L X80</i>	65
3.8.	PRETHODNA ISPITIVANJA ZAVARLJIVOSTI ČELIKA API 5L X80 MOKRIM PODVODNIM ZAVARIVANJEM	68
3.9.	EKSPERIMENTALNE METODE ISPITIVANJA SKLONOSTI ČELIKA PREMA NASTANKU HLADNIH PUKOTINA KOD ZAVARIVANJA	70
3.9.1.	<i>Implant metoda</i>	72
3.9.2.	<i>Tekken metoda</i>	74
4.	EKSPERIMENTALNI DIO	77
4.1.	PRIPREMA UZORAKA	78
4.2.	PODVODNO MOKRO REL ZAVARIVANJE	80
4.3.	ISPITIVANJE UZORAKA –VIZUALNA KONTROLA.....	85
4.4.	ISPITIVANJE UZORAKA – KONTROLA PENETRANTIMA	87
4.5.	MAKROANALIZA	88
4.6.	MJERENJE TVRDOĆE	91
5.	ZAKLJUČAK	99
6.	LITERATURA	101

POPIS SLIKA

Slika 1.	Naftna platforma DP4 [2].....	1
Slika 2.	Uklanjanje morske flore sa konstrukcije prije reparaturnog zavarivanja [3]	2
Slika 3.	Elementi za izvođenje hiperbaričkog zavarivanja [5]	5
Slika 4.	Hiperbarička komora na nosaču platforme [5].....	7
Slika 5.	Nadzor i kontrola procesa zavarivanja s broda [6].....	8
Slika 6.	Hiperbaričko zavarivanje cjevovoda [7]	9
Slika 7.	Zavarivanje prstena na cjevovod [6]	10
Slika 8.	Zavarivanje u hiperbaričkoj mini-komori [9].....	11
Slika 9.	Skica izvedbe zavarivanja u koferdamu	13
Slika 10.	Izvedbe suhih kutija za podvodno zavarivanje [5].....	14
Slika 11.	Izvlačenje potopljenog brodovlja u Pearl Harboru [11].....	16
Slika 12.	Prikaz REL zavarivanja u suhoj i mokroj okolini [12]	17
Slika 13.	Podijela topline u električnom luku [12].....	19
Slika 14.	Prikaz procesa mokrog podvodnog zavarivanja [5]	20
Slika 15.	Tehnika povlačenja [12].....	20
Slika 16.	Tehnika njihanja [12]	21
Slika 17.	"Korak-unatrag" tehnika [12].....	22
Slika 18.	Navy 1 i Navy 2 elektrode [16].....	26
Slika 19.	Krater elektroda Navy 1 i Navy 2 nakon procesa zavarivanja [16]	26
Slika 20.	Karakteristika izvora struje [12].....	28
Slika 21.	Inverter XMT 350 CC/CV [17].....	29
Slika 22.	Generator Big Blue 500 CC [18].....	29
Slika 23.	Izgled zavara dobivenog FCAW postupkom zavarivanja.....	31
Slika 24.	Prikaz procesa FCAW-S postupka zavarivanja [19].....	33
Slika 25.	Prikaz procesa FCAW-G postupka zavarivanja [19]	34
Slika 26.	Dodavač žice za podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom [20]	35
Slika 27.	Oprema za zavarivanje praškom punjenom žicom [20].....	36
Slika 28.	Brzina hlađenja taline pri suhom te mokrom podvodnom zavarivanju [25].....	39
Slika 29.	Sloj za toplinsku obradu zavarenog spoja [15]	41
Slika 30.	Karakteristične greške pri mokrom podvodnom zavarivanju [26].....	42
Slika 31.	Utjecaj napona zavarivanja na rastvorivost vodika [15]	44

Slika 32.	Utjecaj jačine struje na rastvorivost vodika [15].....	44
Slika 33.	Utjecaj jačine struje na rastvorivost vodika pri zavarivanju PPŽ-om [23]	45
Slika 34.	Reparatura nosača platforme [28]	46
Slika 35.	Zavarivanje prirubnice cijevi [28].....	47
Slika 36.	Zavarivanje propelera broda [28]	47
Slika 37.	Izmjena cinkovih anoda [28].....	47
Slika 38.	Razvoj čelika visoke čvrstoće [13].....	53
Slika 39.	Mehanizmi očvršćivanja za čelike X60,X70 i X80 [13].....	54
Slika 40.	Tipične mikorstrukture čelika X60,X70 i X80 [13]	55
Slika 41.	Metode legiranja za povećanje čvrstoće metala zavara [25].....	58
Slika 42.	Utjecaj unosa topline na količinu difundiranog vodika [31].....	60
Slika 43.	Rezultati Tekken metode, mokro podvodno REL zavarivanje [31].....	61
Slika 44.	Pukotina u presjeku zavara ispitnog uzorka S500M [31]	62
Slika 45.	Pukotina u presjeku zavara S355J2G3 [31]	63
Slika 46.	Utjecaj unosa topline na difundirani vodik pri FCAW zavarivanju [33]	64
Slika 47.	Dijagram izmjerenih tvrdoća (API 5L X80 čelik, Thyseen Nautica elektroda)....	69
Slika 48.	Dijagram izmjerenih tvrdoća (API 5L X80 čelik, Lastek elektroda)	70
Slika 49.	Shematski prikaz uređaja za ispitivanje implant metodom [40]	72
Slika 50.	Izgled ispitne ploče po Implant metodi [40]	73
Slika 51.	Dijagram opterećenja implant - eprueta tijekom vremena do loma [40]	73
Slika 52.	Priprema spojeva za Tekken metodu [40].....	74
Slika 53.	Tipična mjesta nastanka hladnih pukotina [41].....	75
Slika 54.	Prikaz ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama po Tekken metodi [41].....	75
Slika 55.	Nacrt za obradu ploča glodanjem.....	78
Slika 56.	Ploče za ispitivanje zavaljivosti Tekken metodom nakon strojne obrade.....	79
Slika 57.	Završna priprema ploča za Tekken ispitivanje.....	79
Slika 58.	Bazen za podvodno zavarivanje	80
Slika 59.	Izvor struje za zavarivanje te njegove karakteristike	81
Slika 60.	Zavarivanje pomoćnih zavara MAG postupkom	82
Slika 61.	Uzorak pripremljen za zavarivanje ispitnog zavara	83
Slika 62.	Pozicioniranje pištolja za početak zavarivanja ispitnog Y-spoja	83
Slika 63.	Mokro podvodno REL zavarivanje	83
Slika 64.	Uzorak 1 (Lastek elektroda Ø3,2, 1 prolaz) - vizualna kontrola.....	85

Slika 65.	Uzorak 2 (Lastek elektroda Ø3,2, 3 prolaza) - vizualna kontrola	86
Slika 66.	Uzorak 3 (Lastek elektroda Ø4, 1 prolaz) - vizualna kontrola.....	86
Slika 67.	Uzorak 4 (Lastek elektroda Ø4, 3 prolaza) - vizualna kontrola	86
Slika 68.	Uzorak 5 (Elektroda EZ 11-F Ø3,2, 1 prolaz) - vizualna kontrola	87
Slika 69.	Uzorak 6 (Elektroda EZ 11-F Ø3,2, 3 prolaza) - vizualna kontrola.....	87
Slika 70.	Uzorci nakon provedenog ispitivanja penetrantima	88
Slika 71.	Rezanje uzoraka na trake plinskim plamenom.....	88
Slika 72.	Nagrizanje uzoraka.....	89
Slika 73.	Makroizbrusak uzorka 1	89
Slika 74.	Makroizbrusak uzorka 2.....	90
Slika 75.	Makroizbrusak uzorka 3	90
Slika 76.	Makroizbrusak uzorka 4.....	90
Slika 77.	Makroizbrusak uzoraka 5	90
Slika 78.	Makroizbrusak uzorka 6.....	91
Slika 79.	Tvrdomjer Reicheter TM12	92
Slika 80.	Plan mjerenja tvrdoće.....	92
Slika 81.	Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 1	93
Slika 82.	Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 2.....	94
Slika 83.	Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 3.....	95
Slika 84.	Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 4.....	95
Slika 85.	Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 5.....	96
Slika 86.	Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 6.....	97
Slika 87.	Usporedba izmjerenih tvrdoća svih uzoraka	97

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Karakteristike invertera XMT 350 i generatora Big Blue 500, [17,18]	30
Tablica 2.	Mogućnost upotrebe zavarivačkih postupaka u vodenoj okolini [31]	59
Tablica 3.	Kemijski sastav šarže čelika kvalitete API 5L X80 korištene za ovaj rad [44] ...	65
Tablica 4.	Popis formula za izračun ekvivalenta ugljika [34]	66
Tablica 5.	Izmjerene tvrdoće pri zavarivanju X80 čelika Thyseen Nautica elektrodom	69
Tablica 6.	Izmjerene tvrdoće pri zavarivanju X80 čelika Lastek elektrodom.....	69
Tablica 7.	Kemijski sastav metala zavara elektrode Lastek 1008 (suho zavarivanje) [42]...	81
Tablica 8.	Mehanička svojstva metala zavara elektrode Lastek 1008 [42].....	81
Tablica 9.	Kemijski sastav metala zavara elektrode EZ 11-F [43]	82
Tablica 10.	Mehanička svojstva metala zavara elektrode Lastek 1008 [43].....	82
Tablica 11.	Parametri zavarivanja uzoraka za Tekken ispitivanje	84

POPIS OZNAKA

Latinske oznake

Oznaka	Opis	Jedinica
H_D	količina difundiranog vodika izražena preko količine nataljenog materijala zavara	ml H_2 /100g
R_{IK}	kritično Implant naprezanje	N/mm ²
R_e	granica razvlačenja	N/mm ²
$R_{p0,2}$	konvencionalna granica razvlačenja	N/mm ²
R_m	vlačna čvrstoća	N/mm ²
K_v	udarna radnja loma	J
A	istežljivost	%
Z	kontrakcija	%
CE	ekvivalent ugljika prema IIW	%
P_{cm}	ekvivalent ugljika prema Itto-Bessyu	%
T	temperatura	°C
q	specifični unos topline	J/mm
v_{zav}	brzina zavarivanja	cm/min
I	jakost struje	A
I_{KS}	struja kratkog spoja	A
U	napon zavarivanja	V
U_0	napon praznog hoda	V
$t_{8/5}$	vrijeme hlađenja od 800 do 500°C	s
b	širina zavara	mm
p	penetracija	mm
h	nadvišenje zavara	mm
m	masa	kg
p	tlak	Pa
R	intenzivnost zaostalih naprezanja	N/mm ²
P	pukotinski parametar	%

Grčki simboli

Oznaka	Opis
ε	greška
η	stupanj iskorištenja

Popis kratica

Oznaka	Opis
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
MIG	Zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina
MAG	Zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina
FCAW-G	Zavarivanje praškom punjenom žicom u plinskoj zaštiti
FCAW-S	Zavarivanje samozaštićujućom praškom punjenom žicom
ASTM	American Society for Testing and Materials
API	American Petroleum Institute
IIW	International Institute of Welding
ZUT	Zona utjecaja topline
LSMZ	Linija staljivanja metala zavora
MZ	Metal zavora
OM	Osnovni metal
PPŽ	Praškom punjena žica
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška
WES	Welding Engineering Society

SAŽETAK RADA

U ovom radu obrađena je problematika procjene zavarljivosti čelika za cjevovode API 5L X80 podvodnim mokrim zavarivanjem. U uvodnom dijelu dan je detaljan prikaz dosadašnjih spoznaja i provedenih istraživanja na području mokrog podvodnog zavarivanja. Osim tehnologija, navedene se i metode određivanja zavarljivosti čelika visoke čvrstoće za primjenjive postupke i uobičajene kriterije. Dan je prikaz analitičkih metoda za određivanje zavarljivosti čelika visoke čvrstoće na temelju ekvivalenta ugljika, te je provedena usporedba sa pristupom određenim u standardu za podvodno zavarivanje AWS D3.6M:1999. Opisan je razvoj čelika visoke čvrstoće te mehanizmi prema kojima se takvi čelici razvijaju. Konačno, opisane su modificirane eksperimentalne metode za procjenu zavarljivosti pri mokrom podvodnom zavarivanju.

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Iz osnovnog materijala API 5L X80 izrađeni su uzorci za ispitivanje zavarljivosti Tekken metodom ispitivanja. Veći dio uzoraka zavaren je mokrim podvodnim REL postupkom zavarivanjem u jednom i u više prolaza, a manji dio REL postupkom zavarivanja na suhom, kako bi bila moguća komparacija mehaničkih svojstava zavarenih spojeva pri tako različitim uvjetima zavarivanja. Nakon zavarivanja proveden je vizualni pregled kao i ispitivanje penetrantima, te su izmjerene tvrdoće HV10. Analiza rezultata pokazala je kako niti kod jednog od uzoraka zavarenih pod vodom nije došlo do pojave hladnih pukotina. Osim toga, rezultati mjerenja tvrdoće pokazali su kako niti jedna vrijednost tvrdoće nije dosegla vrijednost od 375 HV10, koja prema normi AWS D3.6M:1999 predstavlja graničnu vrijednost za zavare klase B. Zaključeno je da se višeprolaznim zavarivanjem te većim unosom topline postižu zavari boljih mehaničkih svojstava te mikrostukture. Uočena je potreba za prilagodbom postojećih ili stvaranjem novih metoda za procjenu zavarljivosti čelika povišene i visoke čvrstoće mokrim podvodnim zavarivanjem. Na osnovi provedenog eksperimentalnog rada i analize podataka dobivenih Tekken metodom ispitivanja zaključeno je da je moguće dobiti zavarene spojeve klase B prema standardu AWS D3.6M na čeliku API 5L X80 uz primjenu adekvatnog unosa topline i dodatnog materijala.

KLJUČNE RIJEČI: podvodno mokro zavarivanje, čelici povišene čvrstoće, zavarljivost, Tekken metoda

SUMMARY

This thesis deals with weldability of pipeline steel API 5L X80 during underwater wet welding.

In introduction, a detailed review of underwater welding technology is given as well as an overview of present research and gained knowledge on the field of underwater welding. Standard methods for weldability assessment of high strength pipeline steels are given and compared with method included in specification for underwater welding AWS D3.6M:1999. Development of high strength steels is described. Methods for experimental determination of weldability in underwater wet welding are also given.

Experimental work was conducted in Laboratory for welding at Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. Pipeline steel API 5L X80 was used for production of samples needed for determination of weldability using Tekken test. Samples were welded in single and multiple layers with different heat inputs in wet and dry welding conditions using SMAW. After welding, samples were examined using visual and penetrant control. Hardness was measured to determine weld microstructure. No cold cracks were found on any of the samples welded underwater. Hardness testing showed that all the welds made underwater satisfied requirements for B class welds given in specification AWS D3.6M:1999. Samples welded in multiple layers and with higher heat input had lower hardness level and better microstructure. Analysis of results showed a need for adjustment of existing or development of new methods for weldability assessment of high strength steels.

On the basis of conducted experimental work and achieved data analysis given by Tekken testing it was concluded that it is possible to achieve acceptable underwater wet weld quality on pipeline steel API 5L X80.

KEYWORDS: underwater wet welding, high strength steel, weldability, Tekken test

1. UVOD

Važnost pomorskih objekata u gospodarstvu jedne regije danas ima nemjerljiv značaj. Bilo da se radi o transportu morskim putem ili eksploataciji podmorja, svjedoci smo ogromnih ulaganja u postojeću infrastrukturu, kao i realizaciju novih projekata. Pomorski transport i intenzivna eksploatacija podmorja podrazumijevaju korištenje objekata, plovila i postrojenja kod kojih je dio konstrukcije ispod vodene linije. Izgradnja i održavanje takvih objekata zahtijeva primjenu posebno razvijenih tehnika, koje osiguravaju dugovječnost i ekonomičnost pri uporabi. U svijetu se ulažu ogromna sredstva kako bi se osigurale dovoljne količine energenata, a vrlo velik broj nalazišta nalazi se ispod mora i oceana. Danas se najveći broj off-shore postrojenja za crpljenje, proizvodnju te transport nafte i zemnog plina nalazi na površini Meksičkog zaljeva, Indijskog oceana, izvan granica kontinentalnog pojasa Brazila i Zapadne Afrike te u dubokim, hladnim vodama Sjevernoga mora [1]. Na slici 1. prikazana je naftna platforma DP4, koja je smještena 120 kilometara sjeverno od Libijske obale. Ovo je najveća platforma na Sredozemnom moru.



Slika 1. Naftna platforma DP4 [2]

Troškovi rada i održavanja off-shore konstrukcija su visoki te se stoga konstantno istražuju nove tehnologije i postupci kojima će se povećati produktivnost, a pritom smanjiti cijena reparature i održavanja. Tijekom godina, a posebice zadnjih nekoliko desetljeća, primjetan je dinamičan razvoj na području održavanja i ispitivanja podmorskih konstrukcija. Površina svjetskog mora pokriva oko 71% površine Zemlje, te se na toj površini danas odvija gotovo 4/5

svjetskog robnog prometa. Sve platforme, brodovi, cjevovodi te ostale off-shore konstrukcije podložne su nastajanju raznih oštećenja uslijed korozije, zamora materijala, teških vremenskih prilika i sudara sa drugim plovilima. Nažalost, često su posljedice razne ekološke katastrofe i gubici ljudskih života uslijed lošeg rukovanja postrojenjima i neprimjerenog održavanja. Nezamjenjivu ulogu u održavanju i reparaturi podvodnih konstrukcija imaju nerazorna ispitivanja i tehnologije podvodnog zavarivanja. Pomorski objekti danas su rasprostranjeni na širokom rasponu dubina, od nekoliko 10-taka metara sve do dubina od 1000 m i dublje. Kod velikih dubina i visokih zahtjeva kvalitete zavarenih spojeva koriste se tehnike suhog podvodnog zavarivanja, a za dubine do približno 70 m i nižih zahtjeva kvalitete zavarenih spojeva, tehnike mokrog podvodnog zavarivanja. Dobro uvježban i educiran tim ljudskih resursa, uključujući ronioce i organizacijski tim na «površini», odlučujući su u ostvarivanju visoke sigurnosti na radu, te su nosioci velike odgovornosti u obavljanju ovakvih poslova. Mokro podvodno zavarivanje, zajedno s ispitivanjem zadobili su povjerenje te su profesionalno prihvaćeni. Za postizanje visoke kvalitete zavarenih spojeva dobivenih ovom tehnikom zaslužan je razvoj novih tehnologija zavarivanja, izvora struje, ronilačke opreme, dodatnih materijala kao i bitnih poboljšanja u osposobljavanju zavarivača. Na slici 2. može se vidjeti kako ronioac uklanja morsku floru sa nosača platforme kako bi mogao procijeniti dali je potrebna reparatura spoja ili ne.



Slika 2. Uklanjanje morske flore sa konstrukcije prije reparaturnog zavarivanja [3]

Tehnika mokrog podvodnog zavarivanja danas je jedna od glavnih tehnika za reparaturne i remontne radove na podvodnim konstrukcijama [4].

2. PODVODNO ZAVARIVANJE

2.1. Suho podvodno zavarivanje

Tehnike podvodnog zavarivanja dijele se u dvije osnovne skupine prema atmosferi u kojoj se zavarivanje odvija. Kod suhih tehnika, zavarivanje se odvija ili unutar raznih izvedbi podvodnih kutija za zavarivanje ili unutar podvodnih komora pri atmosferskom ili hiperbaričkom tlaku. Vrsta plinovite atmosfere i ambijentalni tlak važni su čimbenici koji utječu na proces zavarivanja te na kvalitetu dobivenih zavarenih spojeva. Komprimirani zrak i mješavine za disanje na bazi dušika imaju u pravilu negativan utjecaj na strukturu, svojstva i kvalitetu zavarenih spojeva. Najčešće se kao plinovita atmosfera za disanje koriste smjese na bazi kisika i helija, a kao zaštitni plin koristi se argon. Koliki udio će pojedini plin imati u smjesi ovisi kako o dubini mjesta zavarivanja tako i o tome dali se radi o plinskoj mješavini za disanje, zaštitnoj plinskoj atmosferi pri zavarivanju ili okolnoj atmosferi u komori [5]. Porastom dubine mjesta zavarivanja raste i udio helija u plinskoj atmosferi. Kvaliteta zavarenih spojeva dobivenih suhim tehnikama zavarivanja je dobra i ponekad istovjetna kvaliteti spojeva zavarenih na kopnu jer je moguće postići A i O klase zavara prema specifikaciji za podvodno zavarivanje AWS D3.6M:1999. Ovako visoku kvalitetu zavara postiže se ne samo zahvaljujući okolnim uvjetima (zaštitna atmosfera, hlađenje zavara na zraku), već i zbog mogućnosti predgrijavanja i naknadne toplinske obrade nakon zavarivanja. Također, kod suhog zavarivanja postoje odlični uvjeti za pripremu spoja prije zavarivanja te ako je potrebno lako se izvodi naknadno brušenje. Cijene suhih podvodnih tehnika zavarivanja višestruko su veće od cijena zavarenih spojeva ostvarenih mokrim zavarivanjem zbog angažiranja velike količine prateće nadvodne i podvodne tehničke podrške za dubinska ronjenja. Na primjer, za zavarivanje K-nosača pri izgradnji platforme na moru korištenjem tehnike mokrog zavarivanja postigli bi se mnogo manji troškovi nego korištenjem suhih tehnika zavarivanja [1]. No to nije uvijek moguće, jer su zahtjevi za kvalitetu zavarenih spojeva nekad takvi da su ostvarivi jedino suhim zavarivanjem. Drugi nedostatak jest nefleksibilnost postupka jer da bi se montirala komora potreban je jednostavan pristup mjestu zavarivanja, što kod nosećih konstrukcija platformi nije uvijek slučaj. Stoga se tehnike suhog zavarivanja koje uključuju komore i mini komore primjenjuju prvenstveno za zavarivanje podvodnih cjevovoda. Za rad na platformama češće se koriste tehnike suhog zavarivanja koje koriste kutije kao prostor u kojem se zavarivanje odvija. Pri suhom zavarivanju primjenjuju se jednake tehnike rada kao u tvorničkim radionicama, a najčešće se zavaruje REL, TIG,

MIG/MAG i FCAW postupcima zavarivanja zavisno o dubini, vrsti osnovnog materijala, debljini osnovnog materijala, itd.. Znatan broj istraživanja posvećen je objašnjavanju utjecaja povišenog tlaka na ponašanje električnog luka te optimalnom namještanju parametara zavarivanja [4].

Prema specifikaciji za podvodno zavarivanje AWS D3.6M:1999 tehnike suhog podvodnog zavarivanja dijele se u 4 osnovne varijante:

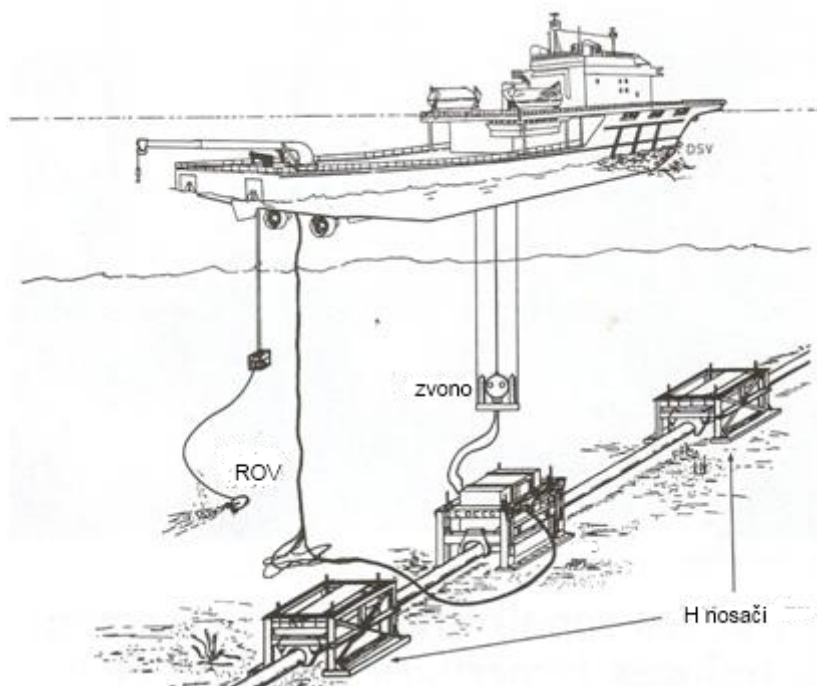
- a) Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj komori
- b) Zavarivanje u suhoj zavarivačkoj mini-komori
- c) Atmosfersko podvodno zavarivanje
- d) Lokalno suho podvodno zavarivanje

2.1.1. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj komori

Zavarivanje pod tlakom ili hiperbaričko zavarivanje dobro je usavršena, istražena te ispitana tehnologija. Prva primjena suhe komore za podvodno zavarivanje bila je u Meksičkom zaljevu krajem 1967. godine na dubini od 33,5 m.

Oko objekta na kojem će se odvijati zavarivanje montira se komora koja se ispunjava plinom pod odgovarajućim tlakom. Praznina između komore i konstrukcije zatvara se brtvama koje se napune plinom. Plin kojim je ispunjena komora najčešće je mješavina kisika i helija. Porastom dubine na kojoj se odvija operacija zavarivanja raste i udio helija u plinskoj mješavini. Sastojci plina u komori moraju se stalno kontrolirati jer u atmosferama s bogatim parcijalnim tlakom kisika uvijek postoji mogućnost nastanka požara. Komore su čelične konstrukcije čiji su oblik i veličina prilagođeni objektu koji se zavaruje. Sa pratećeg ronilačkog broda komora se spušta u vodu te se postavlja na mjesto zavarivanja. Kad god je moguće komora se montira tako da je oslonjena na morsko dno zbog veće stabilnosti. Komora je iznutra opremljena svim potrebnim alatom za pripremu spoja i izvođenje zavarivanja kakav bi se našao i u tipičnoj tvorničkoj radionici. Izvor struje obično se nalazi na brodu te je kabelima povezan sa zavarivačkom komorom, iako se zbog velikih dubina ponekad nalazi i u samoj komori. U ovako teškim uvjetima fleksibilnost je jako važna, te se stoga način izvedbe komore, pomoćnog alata i postupka zavarivanja odabire za svaku situaciju posebno. Dodatni alat prenosi se do komore posebnim vodonepropusnim spremnicima koji spriječavaju bilo kakav kontakt opreme sa vlagom. Postupci zavarivanja koji se najčešće koriste su TIG i MIG/MAG, a zavarivači moraju biti osposobljeni ronionici jer rade u režimu dekompresije ili

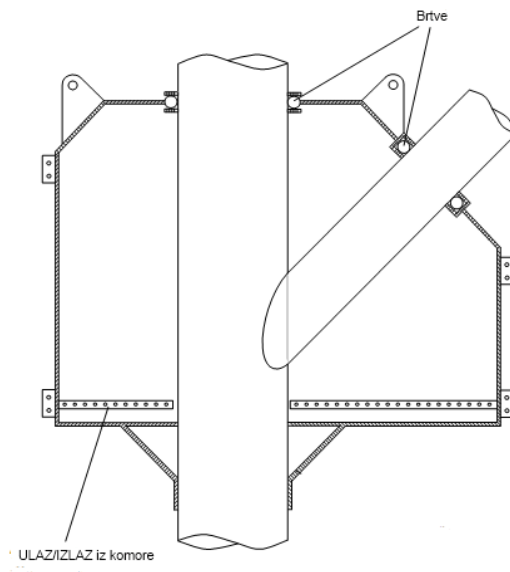
potpune saturacije. Transport ronioca-zavarivača sa pratećeg ronilačkog broda do podvodne komore odvija se tkz. "zvonom" (dekompresijska ronilačka komora), a zavisno o dubini i izvedbi komore sam prijelaz može se izvesti na dva načina. Češći način jest da u ronilačkoj opremi prevale put od zvona do komore roneći kroz vodu. U komori se nalazi otvor za vodu koji im tada služi kao ulaz i izlaz. Na slici 3. može se vidjeti prikaz svih potrebnih elemenata za ispravno izvođenje hiperbaričkog zavarivanja [5].



Slika 3. Elementi za izvođenje hiperbaričkog zavarivanja [5]

Nakon što su ušli u komoru mogu skinuti ronilačko odijelo te normalno raditi u vatrostalnoj odjeći. Da ronioci-zavarivači put između zvona i komore nebi morali prijeći roneći kroz vodu razvijen je i drugi "suhi" način prijelaza. Pritom se zvono izvana spaja na strop komore za zavarivanje. Na takav način zavarivači ne moraju imati ronilačku opremu na sebi koju je zamorno nositi na suhom. Tijekom pripreme za zavarivanje zavarivači mogu normalno udisati plinsku atmosferu u komori. Kada zavarivanje jednom započne zavarivači nose maske za disanje, kojima se preko crijeva dovodi plin za disanje prilagođen uvjetima zasićenja za dubinu na kojoj se nalaze. Treba napomenuti da današnje komore imaju odlične ventilacijske sustave tako da se posebne maske za disanje ne koriste uvijek. U prvim podvodnim komorama za zavarivanje, izgrađenima u SAD-u, od početka se radilo uz dovodenje plina za disanje kroz masku za disanje koju nosi ronioc-zavarivač zato što se pri TIG-zavarivanju koristila zaštitna atmosfera čiji je glavni supstituent bio argon koji pod tlakom djeluje

narkotizirajuće za čovjeka. Tome pridodaju i plinovi koji nastaju tijekom samog zavarivanja, posebice kod ručnog elektrolučnog postupka zavarivanja. S druge strane, u komorama izgrađenim u Francuskoj moglo se raditi bez maske za disanje jer je postojao djelotvoran sustav odsisavanja i pročišćavanja plinova nastalih tijekom zavarivanja. Opskrbljivanje i nadzor radnika i komore odvija se na površini vode preko vodova povezanih s ronilačkim brodom. Plin za disanje kombinacija je kisika, dušika i helija. Kod zavarivanja cjevovoda koristi se pomoćna oprema za centriranje, pritezanje i sučeljavanje dijelova cjevovoda poput rešetkastog okvira za ravnanje ili H-okvira postavljenih na morskom dnu neovisno o komori za zavarivanje. Vrlo visoki troškovi, ograničenje primjene na spajanje dijelova jednostavne geometrije radi problema brtvljenja i visoka složenost operacija glavni su nedostaci hiperbaričkog zavarivanja. Učinkovitost ovog načina zavarivanja može nam predložiti podatak da vrijeme zavarivanja predstavlja $\approx 10\%$ ukupnog vremena od trenutka spuštanja do podizanja komore. Zbog visokih troškova bitno je da se vrijeme praznog hoda u cijeloj operaciji što više smanji. Zato se u pravilu radi u 3 smjene po 8 sati sve dok spajanje cjevovoda nije u potpunosti završeno. U svakoj smjeni u komori radi dvoje ljudi. Budući da saturacijska ronjenja, ovisno o dubini ronjenja mogu trajati i do nekoliko tjedana moderne komore opremljene su uređajima za klimatizaciju, sustavima za podržavanje života i pročišćavanje atmosfere te opremom za nadzor, komunikaciju i kontrolu. Tijekom odmora zavarivači provode vrijeme na brodu u dekompresijskim komorama u kojima vlada jednaki tlak onom na dubini na kojoj se zavarivanje odvija. Također, pri uranjanju i izranjanju u zvonu vlada cijelo vrijeme isti tlak. Glavna prednost korištenja normalne hiperbaričke komore jest mogućnost postizanja visoke kvalitete zavarenog spoja jer je uz eliminaciju štetne atmosfere moguće predgrijavanje i naknadna toplinska obrada zavarenog spoja. Na slici 4. može se vidjeti složenost izvedbe hiperbaričkih komora za posebne namjene poput zavarivanja nosača platforme [5].



Slika 4. Hiperbarička komora na nosaču platforme [5]

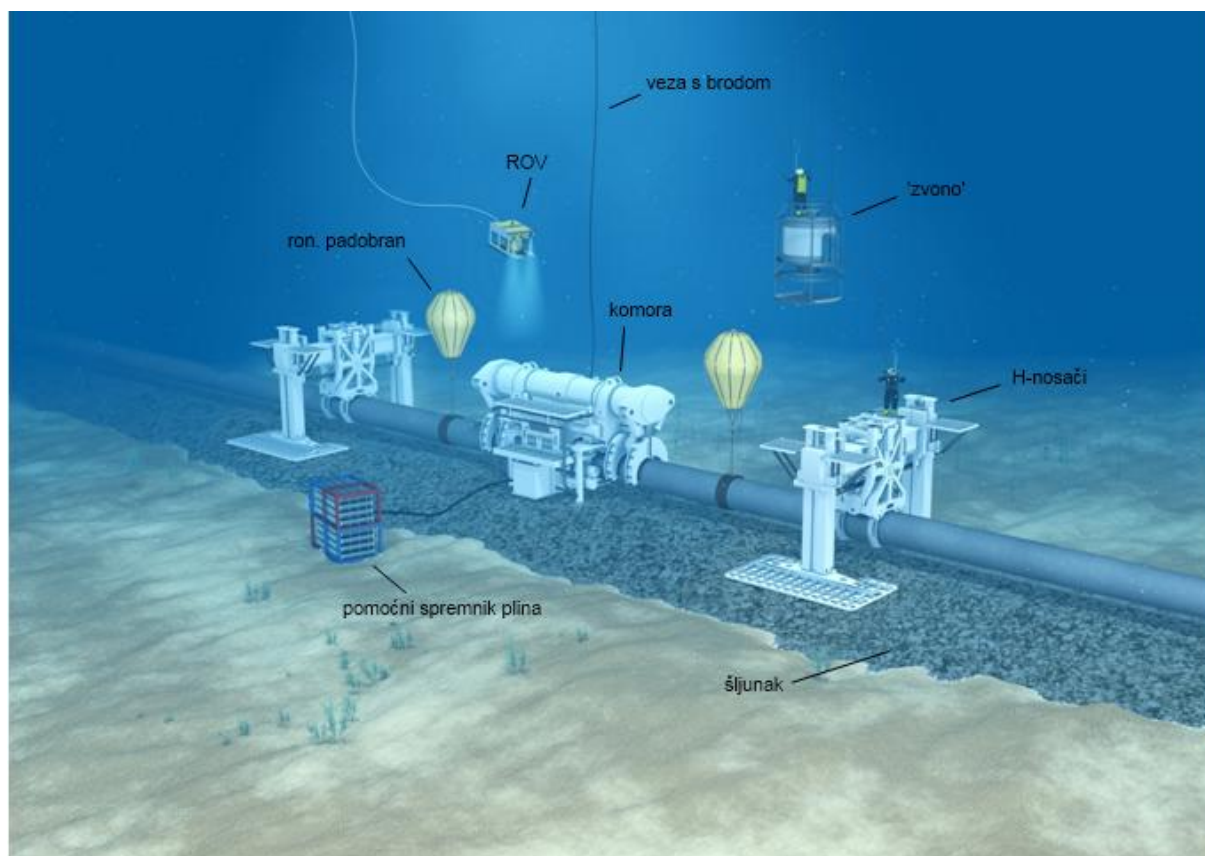
Za hiperbarička zavarivanja cjevovoda na dubinama do 180 m danas se koristi mehanizirani orbitalni TIG postupak zavarivanja hladnom žicom, kojim se upravlja sa ronilačkog broda. U tipičnom podvodnom zahvatu područje oko cjevovoda mora prvo biti iskopano i očišćeno kao dio pripreme za podizanje. Dva velika H nosača, svaki težine 70 tona sa kapacitetom podizanja od 120 tona koriste se za manipulaciju cjevovoda. Kombinirani alat presijeca oštećeni dio cjevovoda vodenim mlazom pod visokim tlakom. Mlaz vode visokog tlaka koristi se za odstranjivanje antikorozivnog premaza na mjestu zavarivanja. Dio koji se zamjenjuje spušta se sa broda i pozicionira pomoću H nosača. Zadnje poravnavanje krajeva cijevi je gotovo kad se komora montira na mjesto gdje će se zavarivanje odvijati. Kada se komora montira, voda u njoj zamijenjuje se plinskom atmosferom. Do ove točke operacija se odvija bez intervencije ronioca. Pomoću kombiniranog alata obavlja se priprema spoja za zavarivanje. Sav rad sa alatom, uključujući postavljanje i uklanjanje glave za zavarivanje izvodi ronioc koji se nalazi unutar komore. Specificirano je pozicioniranje pripremljenih krajeva cijevi do oko 0, + 1 mm zazora u korijenu i oko 0, +2 mm smaknuće pod kontrolom ronioca. Postizanje ovakve tolerancije ključno je za pravilno izvođenje kvalitetnog sučeljenog spoja. Kada su krajevi cijevi u ravnini, ronioc postavlja glavu za zavarivanje, opremu za predgijavanje (elektrootporno ili induktivno) te kablove za odvođenje zaštitnog plina, tako da je sve spremno za početak zavarivanja. Od tog trenutka operateri koji se nalaze na brodu preuzimaju vođenje procesa zavarivanja. Proces se prati kamerama koje daju prednji i stražnji pregled električnog luka i taline zavara. U kontrolnoj kabini na ronilačkom brodu, tim koji se

sastoji od operatera za zavarivanje te inženjera zavarivanja kontrolira proces zavarivanja. Na slici 5. može se vidjeti kontrolna kabina sa inženjerima zavarivanja [6].



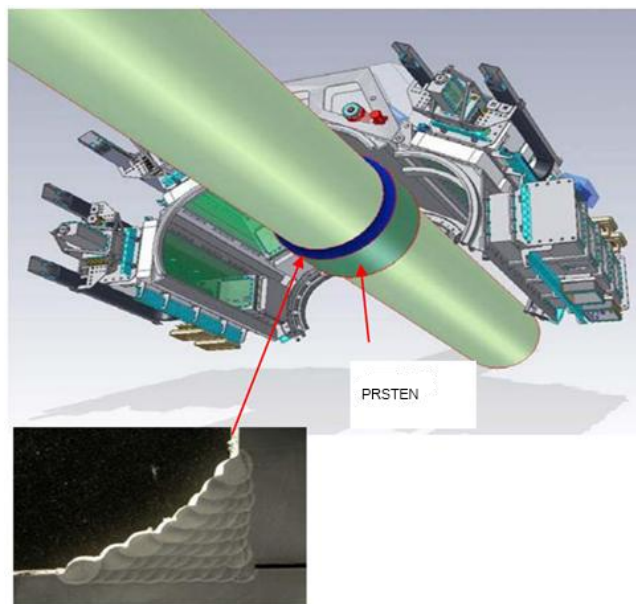
Slika 5. Nadzor i kontrola procesa zavarivanja s broda [6]

Parametri za svaki prolaz određuju se testiranjima koja su prije provedena u hiperbaričkoj testnoj komori na kopnu. Unaprijed programirani parametri zavarivanja mogu se tijekom procesa mijenjati unutar određenog polja tolerancije. Zavarivanje se odvija u zaštitnoj plinskoj atmosferi koja se sastoji od kisika i helija, a služi i kao plin za disanje dvojici ronioca koji asistiraju tijekom zavarivanja. Korištenjem Heliox-a spriječava se narkoza ronioca na velikim dubinama koju izaziva dušik i kisik u krvi, ali i kontaminacija metala zavara dušikom što omogućava dobivanje zavarenih spojeva visoke kvalitete. Na slici 6. prikazan je cijeli sustav za hiperbaričko zavarivanje cjevovoda koji se danas koristi [6].



Slika 6. Hiperbaričko zavarivanje cjevovoda [7]

Za veće dubine u razvoju je potpuno daljinski upravljani sustav za reparaturno zavarivanje do dubina od 1000 m. Kod ovog sustava krajevi cijevi se spajaju vanjskim prstenom dužine 600 mm, koji se kutno zavaruje na stijenku cijevi MIG postupkom zavarivanja. Pritom se koristi zaštitna atmosfera koja se u potpunosti sastoji od argona, jer helij u nekim slučajevima može izazvati ubrzano hlađenje taline zavara. Na slici 7. prikazan je princip rada ovog sustava [6].



Slika 7. Zavarivanje prstena na cjevovod [6]

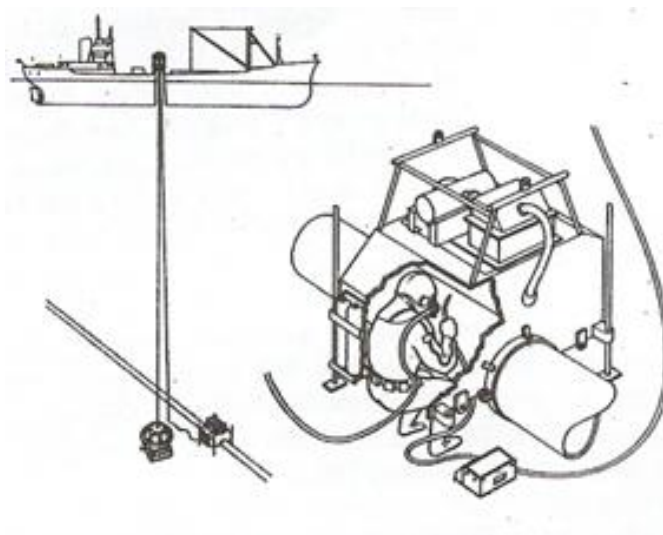
Kutni zavar je osmišljen tako da predstavlja glatki prijelaz između debele stijenke prstena i relativno tanke stijenke cijevi kako bi se izbjegla velika koncentracija naprezanja u korijenu kutnog zvara. Ovaj reparaturni sustav već je uspješno testiran na dubinama od 370 i 940 m u Norveškoj [6].

Prema opsežnim ispitivanjima zavarivačkih procesa na simuliranim dubinama do 2500 m MIG se pokazao kao najbolji postupak zavarivanja za buduće podvodne zavarivačke operacije. Uspoređujući s TIG-om, MIG se pokazao manje osjetljivim na povećanje ambijentalnog tlaka te se parametri zavarivanja ne mijenjaju pri širem rasponu dubina. Kako koristeći MIG postupak zavarivanja nije moguće postići čvrstoću i kvalitetu korijena zvara kakvu se postiže TIG-om, konvencionalni sučeljeni spojevi zamijenjeni su kutnim zavarima na prstenovima. Zavarivanjem sučeljenih spojeva vrijeme zavarivanja skratilo bi se za 10% te bi se time povećala produktivnost, stoga se radi na razvoju MIG postupka za zavarivanje sučeljenih spojeva koji bi u budućnosti trebao zamijeniti metodu s prstenom [6].

2.1.2. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj mini-komori

Drugi tip komore koji se koristi pri hiperbaričkom zavarivanju jest zavarivačka mini-komora. Nakon postavljanja na mjesto zavarivanja, mini komora se ispunjava odgovarajućom plinskom mješavinom do te mjere da se nivo vode u komori spusti ispod nivoa radnog komada kojeg treba zavariti. Zbog malog prostora u komorama nije moguće imati sve alate i ostalu opremu kao u normalnim hiperbaričkim komorama [8]. Ronioci-zavarivači se ne preoblače pri ulasku u komoru već cijelo vrijeme ostaju u ronilačkom odijelu. U mini komori istovremeno može raditi tek jedan zavarivač, a njegova zamjena nalazi se u zvonu, dok se treći član tima nalazi u komori na brodu pri uvjetima ambijentalnog tlaka mjesta zavarivanja.

Ronioc-zavarivač se tijekom zavarivanja nalazi djelomično u vodi s toga se zbog niskih temperatura na većim dubinama često koriste grijana odjela. Kvaliteta zavarenog spoja ovisi o stupnju vlage u atmosferi komore i mogućnosti kvalitetne pripreme spoja. Metoda zavarivanja koja se u praksi uglavnom koristi kod hiperbaričkog suhog zavarivanja u mini komorama, a izvodi je ronioc-zavarivač, je elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim plinom s taljivom elektrodom. Na slici 8. prikazana je skica jedne tipične zavarivačke mini-komore [9].



Slika 8. Zavarivanje u hiperbaričkoj mini-komori [9]

2.1.3. Atmosfersko podvodno zavarivanje

Atmosfersko podvodno zavarivanje može se izvesti na dva načina, pomoću čvrste nepropusne komore u kojoj vlada atmosferski tlak neovisno o dubini na kojoj se nalazi ili pomoću koferdama.

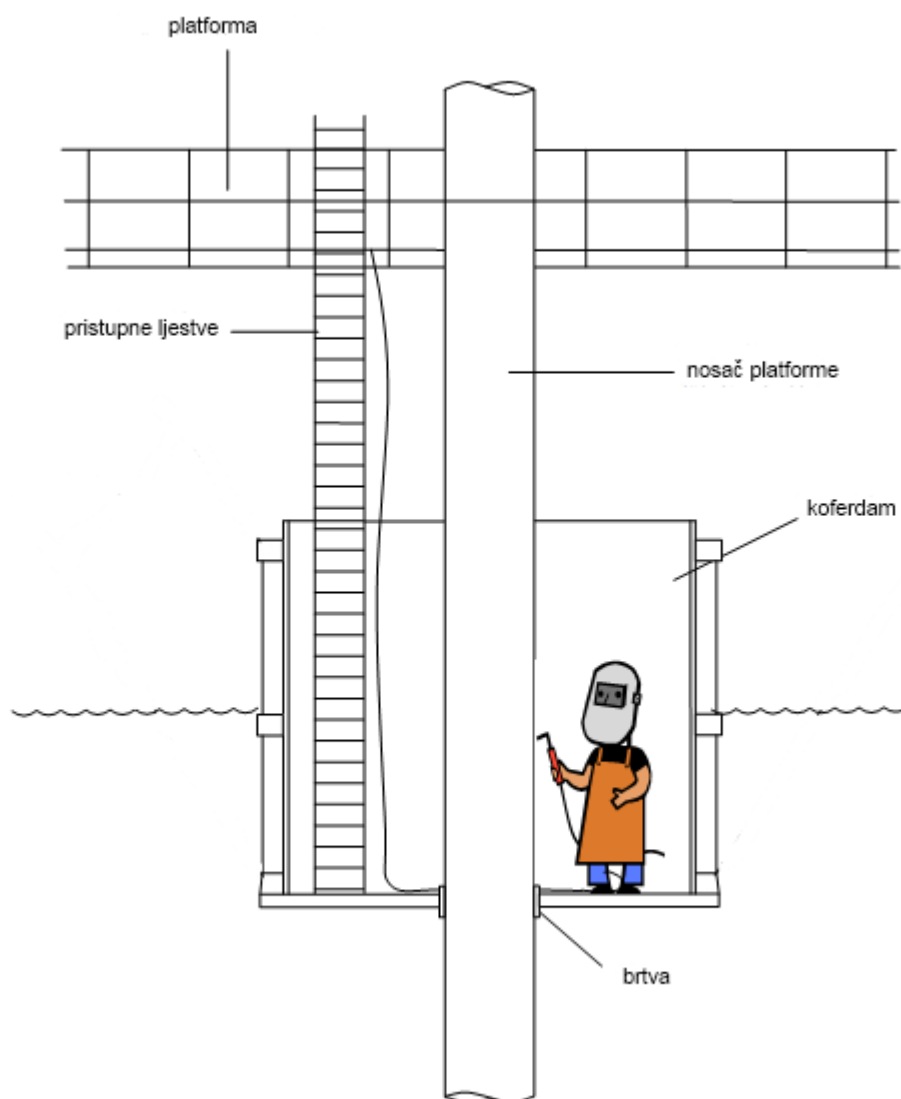
2.1.3.1. Atmosfersko podvodno zavarivanje u nepropusnim komorama

Komora za zavarivače montirana je na strani konstrukcije koju treba zavariti i u njoj vlada normalni atmosferski tlak tijekom zavarivanja. Nakon što se komora montira, voda u njoj zamjenjena je odgovarajućom plinskom atmosferom, a tlak se stabilizira na 1 atmosferu. U komori je moguće koristiti opremu i dodatni materijal kao kod zavarivanja na suhom. Nakon postavljanja komore, zavarivači se transportiraju pomoću zvona do komore te nisu izloženi povišenom tlaku. Veliki problem kod ove tehnike jest pravilno brtvljenje između komore i stijenke radnog komada.

Ova izvedba suhog zavarivanja nije našla značajniju primjenu u praksi zbog visokih investicijskih troškova i vrlo složene prateće tehničke podrške [8].

2.1.3.2. Atmosfersko podvodno zavarivanje u koferdamu

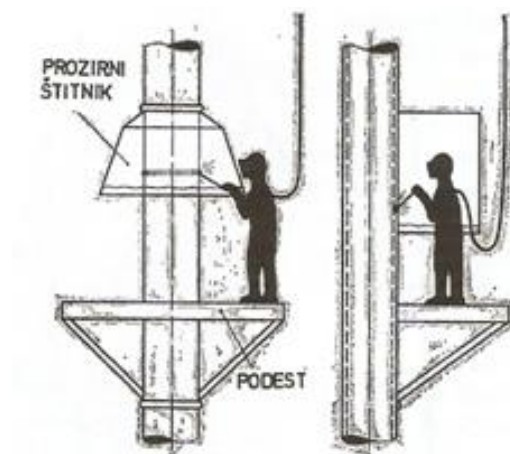
Kako bi se izoliralo mjesto zavarivanja od vode koriste se aluminijske ili čelične konstrukcije, koje su odozgo otvorene prema atmosferi. Na ovaj način nema potrebe za ronjenjem te nema utjecaja povišenog tlaka na parametre zavarivanja. Prije podvodne montaže, sloj polimerne pjene adhezijski se veže na kontaktne površine koferdama s konstrukcijom te sprječava prodor vode u koferdam tijekom zavarivanja. Nakon postavljanja i fiksiranja koferdama na konstrukciju voda koja se nalazi u njemu se ispumpava pomoću posebnih sustava ventila. Zavarivači ulaze u koferdam sa gornje (otvorene) strane. Kod zavarivanja u malim prostorima zbog nakupljanja dima nastalog izgaranjem elektrode i osnovnog metala te zaštitnih plinova uvijek postoji opasnost od eksplozije stoga je bitno ugraditi dobar ventilacijski sustav. Zavarivanje pomoću koferdama često se koristi u praksi zbog visoke kvalitete dobivenih zavara u odnosu na zavare dobivene "mokrim" postupcima zavarivanja. Kao i kod komora, ovdje se često javljaju problemi vezani uz propuštanje vode na mjestima gdje se koferdam i metalna konstrukcija spajaju te je stoga nekad tijekom cijelog procesa potrebno ispumpavati vodu iz koferdama. Skica zavarivanja u koferdamu prikazana je na slici 9. Pri zavarivanju u koferdamu moguće je koristiti REL te MIG/MAG postupak punom i praškom punjenom žicom [10].



Slika 9. Skica izvedbe zavarivanja u koferdamu

2.1.4. Lokalno suho podvodno zavarivanje

Postoji više izvedbi lokalnog suhog podvodnog zavarivanja, no sve se baziraju na tome da se voda odstrani sa mjesta zavarivanja i njegove neposredne blizine tlačenjem plina ili plinskih mješavina u kutije montirane oko mjesta zavara. Veličina i oblik ovih kutija ovisi o konstrukciji koja se zavaruje. U nekim izvedbama ronionoc-zavarivač tijekom zavarivanja može se nalaziti u kutiji koja je otvorena s donje strane. Pritom stoji na improviziranom nosaču. U drugim izvedbama ronionoc se nalazi u vodenoj okolini, a mala kutija od prozirnog materijala montirana je na mjesto zavarivanja. Ronionoc-zavarivač drži pištolj sa unutrašnje strane te izvana prati proces zavarivanja. Na slici 10. prikazane su 2 različite izvedbe suhih kutija. Proces koji se pretežno upotrebljava je MIG, a kvaliteta zavarenih spojeva približna je onima dobivenim na kopnu [5].



Slika 10. Izvedbe suhih kutija za podvodno zavarivanje [5]

2.2. Mokro podvodno zavarivanje

Procedure i kvalifikacije za podvodno zavarivanje sakupljene su u specifikaciji za podvodno zavarivanje AWS D3.6M:1999 u kojoj je mokro zavarivanje opisano kao proces u kojem su i ronionici i električni luk u direktnom kontaktu s vodenom okolinom. Glavne prednosti mokrog zavarivanja u odnosu na hiperbaričko zavarivanje su niski troškovi i jednostavnost izvođenja. Dok je kod hiperbaričkog zavarivanja potrebna velika količina prateće nadvodne i podvodne tehničke podrške čiji su troškovi pokretanja i održavanja golemi, kod mokrog zavarivanja to nije slučaj. Dalje, fleksibilnost tehnike mokrog zavarivanja neusporedivo je veća u odnosu na hiperbaričko zavarivanje gdje je potrebno posebno konstruiranje komora zavisno o prostoru na kojem se zavarivanje izvodi. No ipak, kvaliteta zavarenih spojeva dobivenih mokrim zavarivanjem ne može se mjeriti sa zavarenim spojevima dobivenim hiperbaričkim zavarivanjem. Glavni razlog tome jest vodena okolina u kojoj se zavarivanje odvija. Ona izaziva intenzivno odvođenje topline, tj. hlađenje, koje uzrokuje povećanu tvrdoću zavarenog spoja. Time nastaju zavareni spojevi niske žilavosti i istezljivosti, koja dolazi do izražaja u malim kutevima savijanja, što nije poželjno kod off-shore konstrukcija [5]. Osim toga, zavareni spojevi dobiveni mokrim zavarivanjem imaju visoki udio vodika u svojoj mikrostrukturi, te su skloni nastanku hladnih pukotina. Zato se mokro zavarivanje prvenstveno primjenjuje za spojeve nižih mehaničkih zahtjeva. Da bi se postigla prihvatljiva kvaliteta zavarenih spojeva pri mokrom podvodnom zavarivanju, potrebno je ispuniti više uvjeta. Prvo, dobro uvježbani i educirani ronionici-zavarivači temelj su aktivnosti podvodnog zavarivanja. Za vrijeme treninga ronionica-zavarivača, posebno se naglašava tehnika rada. Upućuje se na to da nepravilna tehnika rada pri zavarivanju povećava udio vodika i porozitet u metalu zavara. Ronionici-zavarivači moraju imati izvjesne vještine zavarivanja u realnim uvjetima i na različitim praktičnim zadacima, kako bi se izbjegle pojave grešaka. Uz umijeće zavarivanja, velika pažnja poklanja se i vještini ronjenja. Od posebne važnosti je dobra koordinacija između ronionica-zavarivača i tima na površini. Kod mokrog podvodnog zavarivanja i rezanja postoji velika opasnost od električnog šoka. Zbog toga je veoma bitna dobra komunikacija kako bi se održala sigurnost zavarivača i učinkovitost rada. Kod mokrog podvodnog zavarivanja, najčešći je postupak ručno elektrolučno zavarivanje. Postupak zavarivanja praškom punjenom žicom najviše se izvodio u državama bivšeg SSSR-a. Zavarivanje trenjem ima prednost jer je neosjetljivo kod primjene na većim dubinama na sredstvima ROV-a. Zavarivanje trenjem godinama se podvodno uspješno primjenjivalo kao sredstvo pričvršćivanja anoda na "off-shore" konstrukcije i brodove [4].

2.2.1. Povijesni razvoj postupka

Prvi izvještaji koji spominju primjenu podvodnog «oxy-arc» rezanja potječu iz 1918. godine gdje se opisuju popravci na parnom brodu St. Paul. Tijekom 1930-ih ruski metalurg Konstantin Khrenov uspješno je u laboratoriju izveo prvi podvodni zavareni spoj. U razdoblju tijekom II. svjetskog rata zabilježeno je više slučajeva podvodnog zavarivanja i rezanja pri čemu se izdvaja raščišćavanje potonulog brodovlja u luci Peral Harbor. Na slici 11. može se vidjeti prikaz izvlačenja ratnog broda iz tog razdoblja.



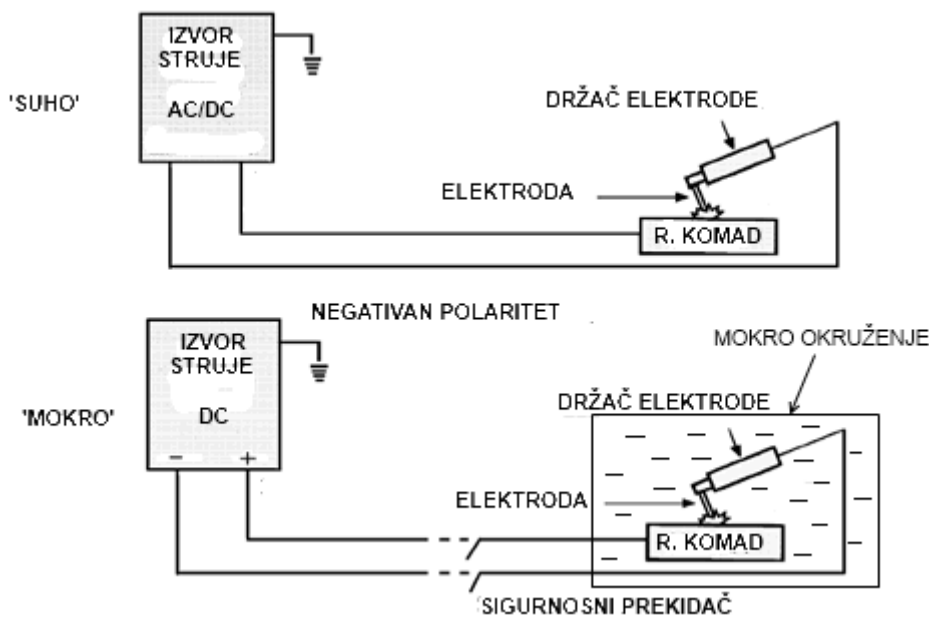
Slika 11. Izvlačenje potopljenog brodovlja u Pearl Harboru [11]

Već tada sinonim za mokro podvodno zavarivanje bio je REL postupak ili ručno elektrolučno zavarivanje. Glavno područje primjene, osim brtvljenja pukotina odnosno otvora u trupovima brodova ispod vodene linije bilo je, a i danas je izgradnja luka i obala, i to prije svega popravak čeličnih vodonepropusnih zidova. Razvojem off-shore tehnologije "mokro" elektrolučno zavarivanje korišteno je u nizu slučajeva za popravke na plovnim off-shore postrojenjima, platformama, podvodnim spremnicima i cjevovodima. Vrsta spoja, kojoj se davala prednost, bio je kutni spoj, a osnovni materijal koji se zavarivao bio je malih debljina. Dubine, na kojima su se izvodili zavarivački zahvati, zanemarujući izuzetke, bile su u području do 50 m, u kojem se prema propisu o sprječavanju nezgoda ovisno o maksimalnom trajanju ronjenja kao zrak smije koristiti komprimirani zrak. Iako je u Meksičkom zaljevu provedeno jedno pokusno zavarivanje na dubini od 180 m, "mokro" ručno elektrolučno zavarivanje se, koliko je poznato, nije koristilo na dubinama većim od 70 m, uz uvjet da su se pritom koristile posebne mješavine za disanje. Ta dubina mnogim praktikantima vrijedi kao granica za "sigurno" REL zavarivanje sa dovoljno velikim mjehurom pare i plina u području mjesta podvodnog zavarenog spoja. U ovom kontekstu treba istaknuti još i to, da ronionci-zavarivači,

na dubinama ispod 50 m mogu koristiti samo specijalne smjese plina za disanje, čiji su sastojci kisik, dušik i/ili helij. To također vrijedi i za područja dubine 10-50 m, ako su zbog trajanja ronjenja na tim dubinama potrebni uvjeti zasićenja pri ronjenju. Iako se u državama bivšeg SSSR-a razvijao postupak zavarivanja punjenom žicom, a u Japanu 90-tih tehnika "zavarivanja s vodenom zavjesom", mehanizirani proces kod kojeg stožasti mlaz vode služi kao "zavjesa", ručno elektrolučno zavarivanje pokazalo se kao najprimjenjivija tehnika mokrog podvodnog zavarivanja [5].

2.2.2. Mokro podvodno zavarivanje REL-postupkom zavarivanja

Kao što je prije bilo navedeno, mokro podvodno zavarivanje prvenstveno se odvija REL-postupkom zavarivanja. Na slici 12. dan je prikaz ručnog elektrolučnog zavarivanja u suhoj i mokroj okolini.



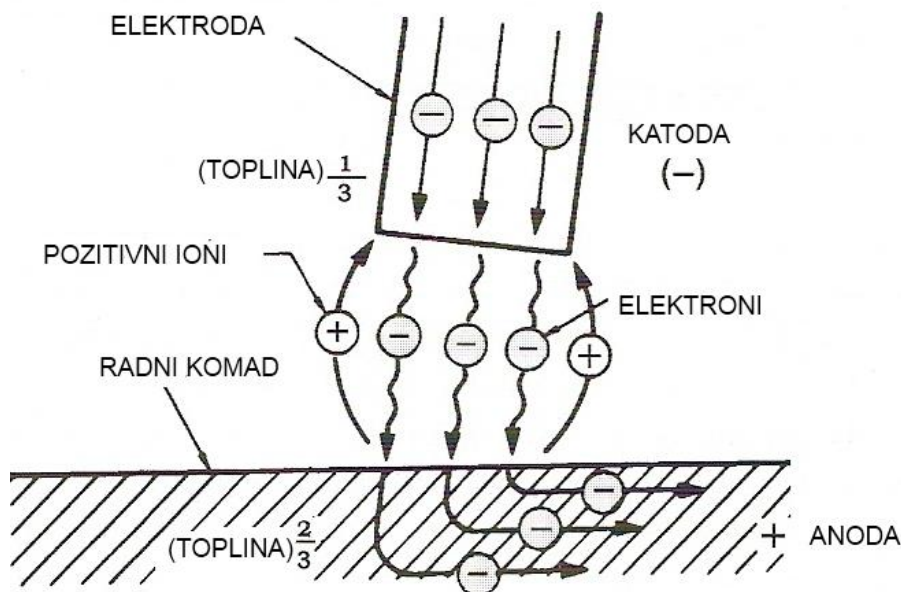
Slika 12. Prikaz REL zavarivanja u suhoj i mokroj okolini [12]

Kao što je vidljivo princip je sličan, iako postoje razlike u opremi koja se koristi. Radni komad povezan je preko kabela sa izvorom struje. Obložena elektroda nalazi se u držaču za elektrodu te je preko drugog kabela povezana sa drugim polom izvora struje. Kada elektroda dođe u kontakt s radnim komadom dolazi do električnog kontakta. Pritom se uspostavlja električni luk koji tali površinu radnog komada i elektrodu. Ako se luk dalje pomiče po radnom komadu ili se prekine, nastala talina će se skrutiti te će nastati zavareni spoj. Bitna razlika između mokrog i suhog REL zavarivanja jest u izvoru struje. Dok se za zavarivanje na suhom mogu koristiti izvori koji daju istosmjernu ili izmjeničnu stuju, kod mokrog REL

zavarivanja koriste se samo izvori koji mogu dati istosmjernu struju. Tijekom razvoja mokrog podvodnog zavarivanja znanstveno je dokazano da istosmjerna struja pod vodom stvara stabilniji električni luk od izmjenične struje te da ga je lakše uspostaviti. Osim toga korištenjem istosmjerne struje opasnost od strujnog udara za zavarivača znatno je manja. Nadalje, kablovi koji zatvaraju strujni krug dobro su izolirani od vodene okoline dvostrukom oblogom. Na kraju je pri mokrom podvodnom zavarivanju iz sigurnosnih razloga potrebno imati sigurnosni prekidač koji se nalazi izvan vode, a čijim se pritiskom zatvara strujni krug. Kako se radi o REL postupku jedina nezavisna varijabla koju možemo kontrolirati jest jačina struje koja ovisi o vrsti i promjeru elektrode [12].

Kod elektrolučnih postupaka zavarivanja toplinu potrebnu za taljenje elektrode i osnovnog materijala daje električni luk. Električni luk može se opisati kao intenzivno izbijanje naboja u jako ioniziranoj smjesi plinova i para različitih materijala koji potječu od metala i obloge elektrode te zaštitnih plinova ili praškova [12].

Kod mokrog podvodnog zavarivanja električni luk se održava u parno-plinskoj atmosferi nastaloj izgaranjem obloge elektrode te disocijacijom vode u električnom luku. Duljina električnog luka neposredno je povezana s naponom, a definirana je kao udaljenost između vrha elektrode i površine radnog komada. Povećanjem duljine električnog luka raste i napon potreban da bi se električni luk održao između radnog komada i vrha elektrode. Male oscilacije u vrijednosti napona tijekom zavarivanja su uobičajene i ne utječu bitno na kvalitetu zavara. Oscilacije iznad 4-5 V mogu znatno narušiti kvalitetu zavara stoga je važno da ronioc-zavarivač ima vrlo dobru tehniku rada. Električni luk je podijeljen na 3 područja generiranja topline, a to su katoda, anoda i plazma. Da bi struja tekla s vrha elektrode na radni komad potrebna je visoka koncentracija elektrona, stoga električni luk za zavarivanje karakterizira visoka jakost struje te nizak napon. Elektroni su emitirani sa katode te se gibaju zajedno sa negativnim ionima u plazmi prema anodi. Pozitivni ioni se gibaju u suprotnom smjeru. Na slici 13 prikazan je slučaj kada je elektroda spojena na negativan, a radni komad na pozitivan pol izvora struje. Navedeno se naziva negativan polaritet i gotovo uvijek se koristi kod ručnog elektrolučnog zavarivanja pod vodom. Temperaturno područje električnog luka kreće se između 3000 i 5000 °C, od čega se približno 65 - 70% topline generira na anodi (+ pol), 10 - 20% topline na katodi (- pol), a ostalih 15 - 20% topline gubi se u okolini preko mjehurića. Na slici 13. može se vidjeti podjela topline u električnom luku [12].



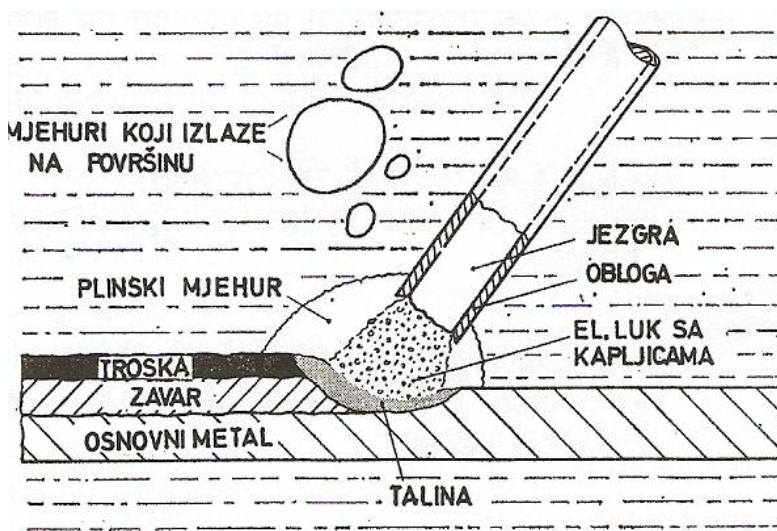
Slika 13. Podijela topline u električnom luku [12]

Razlog tako velikom gubitku topline u vodenoj okolini je velika razlika u temperaturi između vode (5 - 20°C) i električnog luka (3000 - 5000°C). Zbog toga postoji pravilo da jakost struje za zavarivanje pod vodom bude za približno 15% veća od jakosti struje koju bi koristili za iste uvjete pri zavarivanju na suhom. Korištenjem negativnog polariteta većina topline generirat će se na radnom komadu, taljenje elektrode biti će postepeno i jednoliko, a nastali plinski mjehuri pravilnijeg oblika. Pozitivan polaritet rijetko se koristi, uglavnom pri zavarivanju elektrodama većih promjera (Ø4 mm) za zavarivanje debljih radnih komada. Korištenjem pozitivnog polariteta većina topline generirat će se na elektrodi što će izazvati njezino ubrzano taljenje i time brzu popunu zavora [12].

Pri zavarivanju na suhom uslijed visoke temperature električnog luka, metal je kemijski aktivan s glavnim sastojcima zraka, kisikom i dušikom. Ako bi talina metala zavora došla u doticaj sa zrakom došlo bi do stvaranja oksida i nitrda koji bi izazvali pojavu korozije te bi pri skrućivanju taline došlo do znatne degradacije mehaničkih svojstva zavarenog spoja. Iz ovog razloga različiti elektrolučni postupci koriste razne metode zaštite taline od okolne atmosfere. U općoj uporabi za to se koriste zaštitni plinovi, pare, praškovi te troska. Kod mokrog ručnog elektrolučnog zavarivanja zbog velike razlike između temperature vode i električnog luka dolazi do trenutnog isparenja vode oko električnog luka te stvaranja relativno stabilnog plinskog mjehura. Nastali plinski mjehur štiti talinu pri prijenosu s vrha elektrode do radnog komada te joj smanjuje brzinu hlađenja zbog čega će nastali zavor imati bolju mikrostrukturu, a samim time i bolja mehanička svojstva. Volumen plinskog mjehura raste

sve dok njegov polumjer ne postane tangenta inicijalne praznine, zatim se odvaja i ide prema površini, a na njegovom mjestu momentalno nastaje novi plinski mjehur. Ovaj proces ponavlja se sve do prekida električnog luka [13].

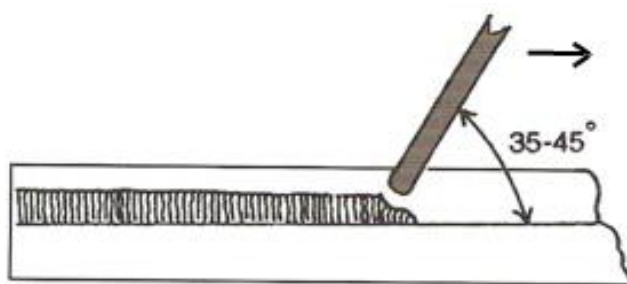
Na slici 14. može se vidjeti prikaz svih relevantnih faktora pri mokrom podvodnom zavarivanju.



Slika 14. Prikaz procesa mokrog podvodnog zavarivanja [5]

2.2.2.1. Osnovne tehnike rada

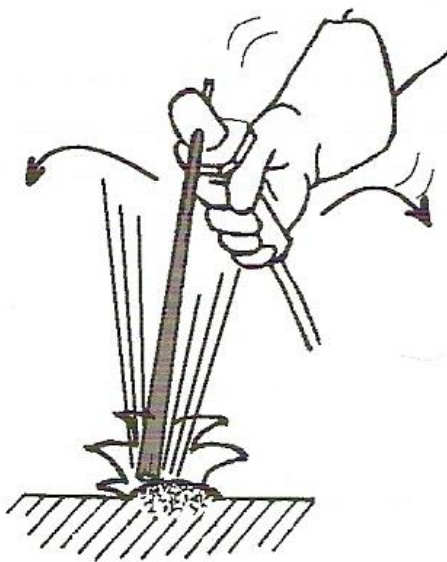
Prema praktičnim iskustvima i literaturi pri mokrom podvodnom zavarivanju koriste se 3 osnovne tehnike rada; tehnika povlačenja, tehnika njihanja te "korak-unatrag tehnika". Kod tehnike povlačenja ronionik-zavarivač povlači elektrodu po radnom komadu, pritom održavajući lagani pritisak na elektrodu dok se ona tali. Na slici 15. može se vidjeti skica ove tehnike rada [12].



Slika 15. Tehnika povlačenja [12]

Uzimajući u obzir da pritom održava pravilan kut nagiba elektrode u odnosu na radni komad i jednoliku brzinu povlačenja, nastati će pravilan sloj zavarenog spoja. Brzina povlačenja elektrode po radnom komadu (brzina zavarivanja) direktno je povezana s kutom nagiba elektrode. Što je kut nagiba elektrode veći, brzina povlačenja elektrode biti će manja, nastali sloj zvara širi, a penetracija veća. Kod mokrog zavarivanja kut nagiba elektrode mora biti oko $35-45^\circ$ zato što se time nastali plinski mjehuri mogu odvajati od električnog luka a da pritom ne ometaju taljenje elektrode [12].

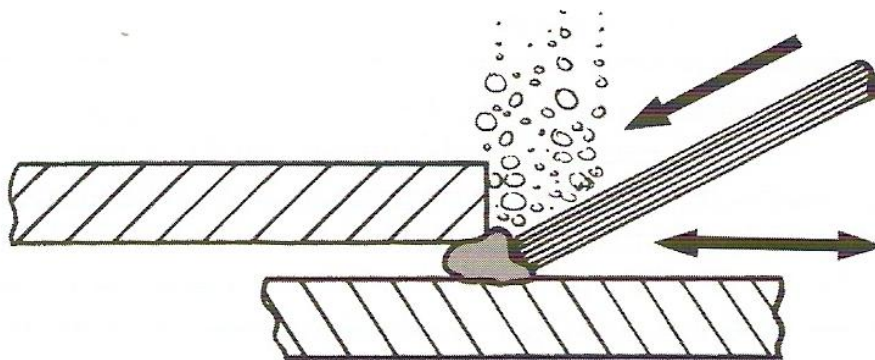
Kod tehnike njihanja elektroda se njiše tako da se u točki najbližoj držaču elektrode diže i spušta u vertikali, a time se kut nagiba elektrode konstantno mijenja tijekom zavarivanja. Na slici 16. prikazana je ova tehnika rada [12].



Slika 16. Tehnika njihanja [12]

Ovime se postiže veći depozit metala te se sprječava nekoncentrično izgaranje elektrode, posebice pri zavarivanju korijena zvara. Kako je kut nagiba elektrode kod mokrog REL zavarivanja nešto manji nego kod suhog i kako se elektroda drži u stalnom kontaktu s radnim komadom ubrzo bi tijekom zavarivanja došlo do nekoncentričnog izgaranja elektrode po njenom promjeru. Pritom bi se električni luk savinuo prema najbližoj točki radnom komadu te bi se time onemogućila pravilna kontrola nad depozitom metala zvara. Kako bi se to spriječilo kut nagiba elektrode se mijenja tehnikom njihanja. Ovo je najbolja tehnika za zavarivanje korijena zvara kod kutnih spojeva [12].

Korištenjem "korak-unatrag" tehnike ronjoc odugovlači pomicanje elektrode dalje duž žlijeba na trenutak tako da ju pomiče nekoliko milimetara natrag u talinu zavara. Time se potiču veća čvrstoća i širina zavarenog spoja, a smanjuje se brzina hlađenja taline čime nastali zavareni spoj ima bolja mehanička svojstva. Kod zavarivanja kutnih spojeva u tri prolaza, ova tehnika je idealna za zadnji prolaz, jer se njome uklanjaju sve manje greške nastale pri drugom prolazu uslijed netočnog pozicioniranja sloja zavara. Treba napomenuti da su kutni spojevi najčešće korišteni u praksi pri mokrom ručnom elektrolučnom zavarivanju, i da se uvijek ostvaruju u najmanje 3 prolaza. Na slici 17. može se vidjeti prikaz ove tehnike rada [12].



Slika 17. "Korak-unatrag" tehnika [12]

2.2.2.2. *Dodatni materijali*

Za dobivanje zavarenih spojeva odgovarajuće kvalitete pri mokrom podvodnom zavarivanju potrebno je koristiti elektrode s posebnom vodonepropusnom oblogom. Obložena elektroda sastoji se od metalne jezgre na koju je koncentrično nanescena nemetalna obloga, čiji sastav određuje vrstu elektrode. Metalna jezgra elektrode mora biti od istog ili sličnog materijala kao i radni komad, a obloga se određuje prema osnovnom metalu, zahtjevima kvalitete zavarenog spoja i uvjetima pri zavarivanju. Metalna jezgra elektrode za opću uporabu dobiva se rezanjem niskougljične čelične žice na potrebnu dužinu, a obloga nastaje mješanjem raznih minerala i kemikalija. Metalna jezgra ima ulogu vodiča za struju te glavnog metala za popunu spoja [12].

Funkcije obloge su [12]:

1. Osigurava uspostavljanje i lako održavanje električnog luka.
2. Taljenjem stvara zaštitnu plinsku atmosferu oko električnog luka i taline metala, koja spriječava kontaminaciju zavarenog spoja kisikom i vodikom nastalim disocijacijom vode.
3. Osigurava nastanak troske koja štiti zavar od utjecaja atmosfere te smanjuje brzinu hlađenja. Troska mora biti takva da ju je moguće jednostavno ukloniti.
4. Sadrži legirne elemente koji poboljšavaju mehanička svojstva zavarenog spoja.
5. Štiti elektrodu od kontakta s vodom.
6. Olakšava zavarivanje u prisilnim položajima.

Obloge elektroda mogu biti [14]:

- a) kisele (A - acide)
- b) bazične (B - basic)
- c) celulozne (C - cellulosic)
- d) rutilne (R - rutile)
- e) oksidne (FeO , SiO_2)

Kisele elektrode nije preporučljivo koristiti za zavarivanje čelika sa povišenim sadržajem sumpora radi opasnosti od toplih pukotina. Ove elektrode mogu se koristiti u svim položajima zavarivanja uz primjenu istosmjernje ili izmjenične struje za zavarivanje. Pri normalnim uvjetima zavarivanja (bez vlažnosti okoline, uz dobro skladištenje i rukovanje) nije ih potrebno posebno sušiti. Ne koriste se za podvodno zavarivanje [14].

Bazične elektrode daju zavareni spoj dobrih mehaničkih svojstava (ovo se odnosi posebno na izduženje i žilavost), a zbog manje prisutnosti štetnih plinova i nemetalnih uključaka u metalu zavara smanjena je i sklonost nastanku pukotina i poroznosti. Naime, sastav troske dobivene zavarivanjem bazičnim elektrodama veže O_2 , H_2 , S i P na sebe. Popratna pojava jest da se troska teško odstrani nakon završetka zavarivanja. Zbog visokog sadržaja CaF_2 u sastavu bazičnih elektroda smanjena je stabilnost električnog luka pri zavarivanju, stoga se elektrode sa bazičnom oblogom također ne koriste pri mokrom podvodnom zavarivanju. Najčešće se primjenjuju kod zavarivanja konstrukcija sa visokim zahtjevima za mehanička svojstva i kvalitetu [14].

Rutilne elektrode pokazale su najbolja operativna svojstva za primjenu pri mokrom podvodnom zavarivanju. Jedan od glavnih razloga tome jest odlična stabilnost električnog luka pri zavarivanju ovim elektrodama. Zavareni spojevi dobiveni korištenjem rutilnih elektroda posjeduju dobra mehanička svojstva, lijep izgled te mogućnost jednostavnog otklanjanja troske nakon završetka zavarivanja. U odnosu na bazične elektrode, zavareni spojevi dobiveni rutilnim elektrodama posjeduju slabiju žilavost u metalu zavara. Mogu se koristiti pri zavarivanju istosmjernom ili izmjeničnom strujom [14].

Celulozne elektrode koriste se za zavarivanje u svim položajima koristeći pritom istosmjernu ili izmjeničnu struju. Posjeduju veliku brzinu taljenja, a troska im se lako otklanja. Radi velikog provara koriste se za zavarivanje korijena cijevi [14].

Metalna jezgra elektrode može biti od [12]:

- a) niskougličnog mekog čelika (C/Mn)
- b) niskolegiranog čelika
- c) autenitnog nehrđajućeg čelika
- d) elektrode na bazi nikla

Elektrode od niskougljičnog mekog čelika (C/Mn) koriste se za opću uporabu i prikladne su za zavarivanje niskougljičnih čelika. Za zavarivanje čelika s višim udjelom ugljika ili legiranih elemenata u svom sastavu koriste se elektrode od austenitnog nehrđajućeg čelika te elektrode na bazi nikla. Zavareni spojevi dobiveni austenitnim nehrđajućim elektrodama i elektrodama na bazi nikla mogu u svom sastavu zadržati vodik u krutom stanju te se time smanjuje učestalost nastajanja hladnih pukotina u ZUT-u. Ipak, korištenjem austenitnih nehrđajućih elektroda na dobivenim zavarenim spojevima javlja se ravnomjerno raspoređen porozitet. Zavareni spojevi dobiveni takvim elektrodama imati će dobru vlačnu čvrstoću, no zbog razlike u toplinskoj ekspanziji između osnovnog metala (feritni) i elektrode (austenitna) nastali zavareni spojevi biti će podložni pucanju uslijed velikih zaostalih naprezanja. Kod elektroda na bazi nikla to nije slučaj. Iako zavareni spojevi dobiveni austenitnim nehrđajućim elektrodama imaju manju opasnost od nastajanja hladnih pukotina, zbog pukotina u metalu zavora uz granicu ZUT-a njihova uporaba je ograničena. Zavareni spojevi nastali elektrodama na bazi nikla također su pokazali dobru otpornost na pojavu hladnih pukotina u ZUT-u. Kako je razlika u toplinskoj ekspanziji između osnovnog metala (ferit) i metala zavora (nikl) manja, pritom neće doći ni do pucanja uslijed zaostalih naprezanja. Korištenje elektroda na bazi nikla ograničeno je dubinom, te se pri dubinama većim od 10 m na zavarenim spojevima stvara visoki udio poroziteta. Naime, zbog nedovoljnog unosa topline, plinovi nastali izgaranjem elektrode ne stignu difundirati iz metala zavora. Daljnjim razvojem izvora energije i obloga elektroda eksploatacija elektroda na bazi nikla mogla bi se povećati [15].

Najbolja operativna svojstva pokazale su rutilne elektrode sa binarnim premazom. Prvi sloj premaza je električki provodljiv te osigurava lako uspostavljanje i održavanje električnog luka. Osim toga je u određenoj mjeri nepromočiv te ima vrlo dobra mehanička svojstva. Drugi, vanjski sloj je električni izolator sa odličnim mehaničkim svojstvima i izvanrednom vodonepropusnošću. Prvenstvena zaštitna funkcija sekundarnog (vanjskog) sloja jest da omogućava uporabu ovakvih elektroda u kemijski agresivnim sredinama, te pri većim dubinama. Kod ostvarivanja ovakvih binarnih kombinacija potrebno je obratiti pažnju na njihovu međusobnu kemijsku neutralnost, kako nebi došlo do njihovog spontanog mješanja te stvaranja jedne nedefinirane prevlake [16]. Kvaliteta obloge posredno određuje kvalitetu zavarenog spoja. Dodatne zalihe rutilnih elektroda moraju biti pohranjene na suhim mjestima temperature 15-30 °C. Ako je potrebno, proces sušenja odvija se pri maksimalnoj temperaturi od 80°C u trajanju od 1 sat. Treba napomenuti da obloga ipak nemože štititi elektrodu tijekom dužeg perioda pod vodom.

Stoga se u pravilu ne uranja pod vodu više elektroda nego što se može iskoristiti u približno 30 minuta [12]. Na slikama 18. i 19. prikazane su elektrode za podvodno zavarivanje Navy 1 i Navy 2 razvijene na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu [16].



Slika 18. Navy 1 i Navy 2 elektrode [16]



Slika 19. Krater elektroda Navy 1 i Navy 2 nakon procesa zavarivanja [16]

Ove elektrode imaju dvostruki zaštitni premaz koji omogućava laganu uspostavu i vođenje električnog luka, te sprječava raspad obloge. Jedna od značajnih karakteristika novorazvijenih elektroda jest uspostavljanje električnog luka bez mehaničkog skidanja zaštitnog sloja. Na taj se način povećava operativnost ronioca-zavarivača, kao i stupanj iskorištenja vremena boravka pod vodom. Osim rutilnih elektroda kod kojih se ne može kontrolirati udio disociranog vodika u zavaru postoje još i posebne elektrode koje se tijekom

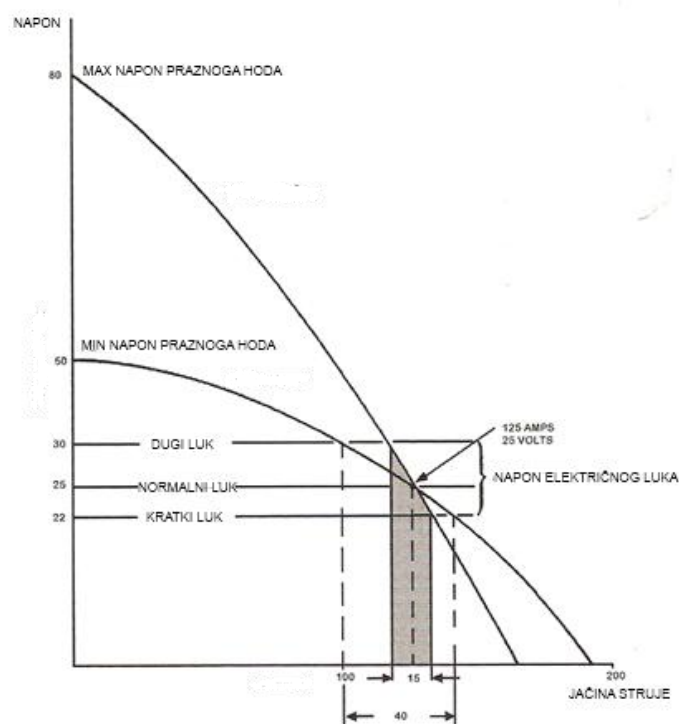
proizvodnje podvrgavaju dodatnim toplinskim procesima kako bi se udio vlage u njima maksimalno smanjio. Korištenjem takvih elektroda nastali zavareni spojevi imati će manji udio vodika nego zavareni spojevi dobiveni rutilnim elektrodama. Proizvođači elektroda za mokro podvodno zavarivanje razvili su vlastite elektrode po pitanju sastava obloge, metala za popunu zavara i vodonepropusnog sloja, tako da svaka elektroda ima specificirano kad, gdje i pri kojim parametrima se koristi [12].

2.2.2.3. Oprema

Oprema koja se koristi za mokro zavarivanje REL-postupkom veoma je slična opremi za rad na suhom, uz određene modifikacije koje su nužne iz sigurnosnih razloga. Opremu možemo podijeliti prema primjeni na opremu za zavarivanje te opremu za ronjenje. Oprema za ronjenje uključuje suho ronilačko odijelo, masku za suho odijelo te crijevo za vanjsku dobavu. Ono se koristi za dobavu zraka i komunikaciju sa timom na površini preko žičane veze. Crijevo je na površini spojeno sa spremnikom zraka. Oprema za zavarivanje se sastoji od istosmjernog izvora struje sa obavezno nižim naponom praznog hoda (kako bi se umanjila opasnost od strujnog udara za ronioca-zavarivača), specijalnih kabela s pojačanom izolacijom, pištolja za zavarivanje te posebnih elektroda za mokro podvodno zavarivanje. Da bi se osigurali pogodni uvjeti za sve vrste podvodnih zavarivačkih radova potrebno je imati izvor struje koji može osigurati minimalno 300 A. Ispravljači su konstruirani tako da imaju smanjen napon i primjerena svojstva za zavarivanje pod vodom. Također se upotrebljavaju tranzistorski izvori struje, a daljnja istraživanja upućuju na to da sadašnji stadij razvoja tehnologije izvora struje omogućuje bolje uspostavljanje električnog luka i njegovu stabilnost. Intenzivno dinamičko ponašanje izvora struje potrebno je za ostvarivanje električnog luka u većim dubinama. Korištenjem slabijih strojeva produžuje se vrijeme zavarivanja, a time i vrijeme boravka zavarivača pod vodom. Povećanjem dubine na kojoj se zavarivanje odvija raste i potrebna dužina kabela za zavarivanje, što može izazvati pad napona zbog velike udaljenosti koju struja mora prijeći od izvora do radnog komada. Stoga izvori struje za mokro podvodno zavarivanje moraju moći dati dovoljno visok napon praznoga hoda (Open Circuit Voltage). Izvori struje za ručno elektrolučno zavarivanje na kopnu imaju strmopadajuću karakteristiku. Smisao strmopadajuće karakteristike jest da manje promjene dužine električnog luka, tj. napona ne utječu znatno na vrijednost jačine struje. Time se postiže jednaka brzina izgaranja elektrode bez obzira na manje promjene vrijednosti napona. Kod

mokrog zavarivanja ovi izvori se obično modificiraju tako da je iznos napona strujnog kruga povišen na najveću dopustivu vrijednost, a da se pritom zadrži strmopadajuća karakteristika. Na slici 20. prikazan je dijagram strmopadajuće karakteristike struje [12].

Oprema za zavarivanje mora zadovoljiti sve sigurnosne aspekte, a ronioncu se moraju omogućiti što je moguće bolji radni uvjeti zbog ograničenog vremena boravka pod vodom te ekonomičnosti samoga rada. Potrebno je redovito održavati opremu i to prema određenom planu kako bi joj se produžio radni vijek trajanja te osigurala ispravnost u realnim uvjetima [16].



Slika 20. Karakteristika izvora struje [12]

Na slici 21. prikazan je inverter XMT 350 tvrtke Miller, koji je pogodan te često korišten za mokro podvodno zavarivanje.



Slika 21. Inverter XMT 350 CC/CV [17]

Prikazani inverter može raditi u strmopadajućoj (Constant Current) ili u ravnoj karakteristici konstantnog napona (Constant Voltage). Za primjenu kod mokrog podvodnog zavarivanja koristi se strmopadajuća karakteristika struje. Na slici 22. nalazi se generator Big Blue 500 CC, izvor struje posebno namijenjen za mokro podvodno zavarivanje.



Slika 22. Generator Big Blue 500 CC [18]

Na tablici 1. nalaze se neke bitnije informacije o mogućnostima navedenih strojeva.

Tablica 1. Karakteristike invertera XMT 350 i generatora Big Blue 500, [17,18]

Izvor struje	Ulaz struje	Intermitencija	Raspon struja pri CC karakteristici (A)	Napon praznog hoda (V)	Dimenzije (mm)	Masa (kg)
XMT 350 CC/CV	Trofazni	60% za 350A pri 34V	5 - 425	75	V: 432 Š: 318 D: 610	36,3
	Jednofazni	60% za 300A pri 32V				
Big Blue 500 CC	Jednofazni	100% za 500A pri 40V (20kW)	55 - 600	95	V: 1092 Š: 724 D: 1654	769
		60% za 550A pri 34V (18,7kW)				
		40% za 600A pri 30V (18kW)				

U određenim situacijama koristi se dodatna pomoćna oprema poput sistema za stabilizaciju zavarivača (košare, platforme, magneti, itd.), posebnih naprava za pridržavanje ili centriranje radnog komada te u slučaju veoma niskih temperatura grijana odjela.

Ovisno o temperaturi preporuča se slijedeći odabir [8]:

- 30 do 20 C° - suho odijelo bez pododijela
- 20 do 15 C° - suho odijelo sa pododijelom
- 15 do 5 C° - suho odijelo sa debelim pododijelom
- niže od 5 C° - odijelo sa grijanjem

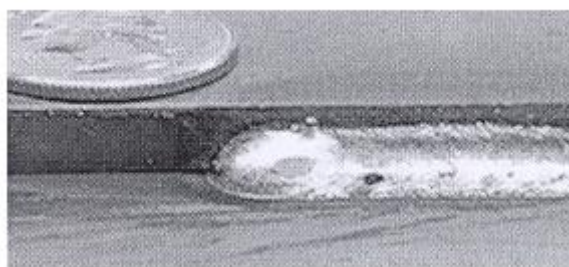
Niske temperature osim što uzrokuju ubrzano odvođenje topline sa mjesta zavara mogu i uzrokovati kvarove na uređajima za dobavu zraka uslijed zamrzavanja regulatora za disanje [12].

2.2.3. *Mokro podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom*

Pojam mokrog podvodnog zavarivanja pretežito je vezan uz REL postupak zavarivanja. Unatoč tome, mokro podvodno zavarivanje moguće je izvoditi i praškom punjenom žicom. Ovaj postupak razvijen je u bivšim državama SSSR-a, te se tamo i najviše izvodio. Dok se uz REL postupak zavarivanja mora voditi računa o ronioncu-zavarivaču, podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom može se izvesti i bez čovjeka. To traži izradu kompleksnih automata za zavarivanje, ali postoji puno manji rizik te nema vremenskih ograničenja za radove na većim dubinama. Uz kvalitetna rješenja pitanja izvora struje, regulacije, opreme i dodatnih materijala očekuje se da bi podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom moglo u budućnosti u potpunosti zamjeniti REL postupak zavarivanja.

2.2.3.1. *Općenito o zavarivanju praškom punjenom žicom*

Proces zavarivanja praškom punjenom žicom (eng. FCAW - Flux cored arc welding) koristi toplinu dobivenu električnim lukom za taljenje žice (dodatnog materijala) i radnog komada koji se zavaruje. Zaštitni plinovi i pare generirani su taljenjem praška koji se nalazi u cjevastoj elektrodi, a može se koristiti i dodatna zaštita preko vanjsko dovedenog zaštitnog plina. Postupak je nastao kao zamjena za REL, jer je upotreba kontaktnih štapnih elektroda nespretna, a prevladani su i mnogi nedostaci koji se pojavljuju kod REL-a. Na slici 23. može se vidjeti jedan tipičan izgled zavara dobivenog FCAW postupkom zavarivanja.



Slika 23. Izgled zavara dobivenog FCAW postupkom zavarivanja

Praškom punjena žica sastavljena je od metalne obloge i jezgre koja se sastoji od raznih materijala u prahu. Tijekom zavarivanja stvara se troska na zavarenom spoju. Žica ispunjena praškom automatski se dovodi do mjesta zavarivanja. Zaštitni plin također se dovodi kroz cijevi zavarivačkog pištolja štiteći talinu zavara od oksidacije pri zavarivanju. Prašak unutar žice štiti zavar od atmosfere pomoću troske koja pokriva zavar [19].

2.2.3.2. Vrste FCAW postupka zavarivanja

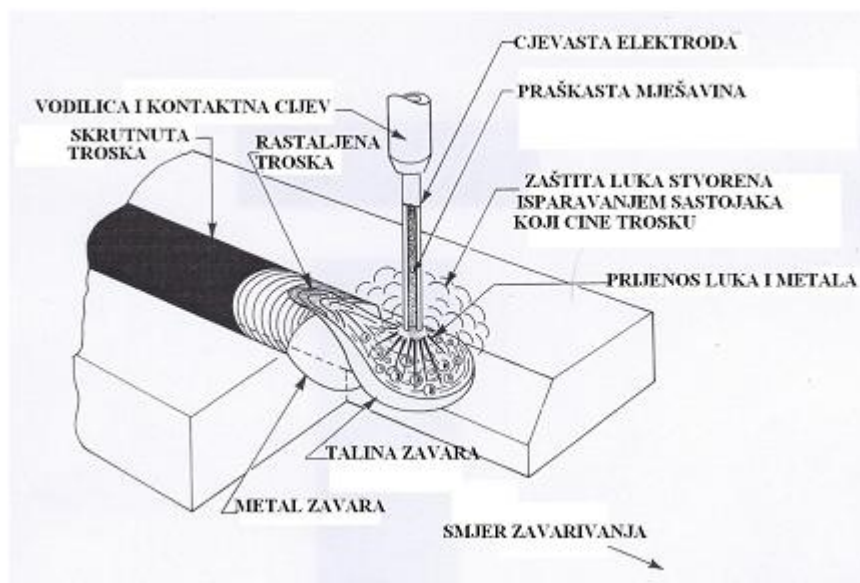
Postoje dvije osnovne vrste FCAW postupka zavarivanja [19]:

1. FCAW-S postupak zavarivanja je postupak koji tijekom zavarivanja ne zahtijeva zaštitni plin, zbog praška u jezgri unutar potrošne elektrode. Ovaj postupak još se naziva zavarivanje samozaštićujućom praškom punjenom žicom. Prema normi za zavarivanje ISO 4063 broj ovog postupka je 114. Jezgra žice sadrži prašak raznog sastava i sastojaka koji podvrgnuti visokoj temperaturi stvaraju zaštitni plin radi zaštite luka. Osnovne prednosti FCAW-S postupka zavarivanja jest mogućnost zavarivanja na otvorenom (na terenu), odlična dubina penetracije te otpornost na strujanje zraka.

2. FCAW-G postupak zavarivanja je postupak koji tijekom zavarivanja koristi zaštitni plin koji se dobavlja izvana. Ovaj postupak još se naziva MAG zavarivanje praškom punjenom žicom. Prema normi ISO 4063 broj ovog postupka je 136. Ova vrsta zavarivanja preporuča se za metale debljeg presjeka i kod položenih položaja zavarivanja. Nastala troska tijekom zavarivanja lakše se uklanja, ali ne može koristiti kod vjetrovitog vremena, jer gubitak zaštitnog plina izaziva poroznost na površini zavara.

2.2.3.2.1. FCAW-S postupak zavarivanja

Žica s praškastom jezgrom tali se toplinom električnog luka, pritom se stvaraju zaštitni plin i praškasti agensi radi dobivanja kvalitetnog zavara bez vanjskog zaštitnog plina. Nakon završenog procesa zavarivanja sa zavara se uklanja nastala troska. Bitne parametre čine nagib zavarivačkog pištolja koji je propisan i poboljšava preglednost pri zavarivanju i parametri dodavača žice. Ovaj postupak obično se koristi za zavarivanje niskougljičnog čelika koji se koristi na otvorenom, budući da je moguće popraviti poljoprivrednu i građevinsku mehanizaciju u vrlo kratkom vremenskom periodu. Slobodni kraj žice još je jedna bitna varijabla koja utječe na konstrukciju spoja. Struja zavarivanja i napon mogu varirati ovisno o vrsti i promjeru elektrode. Na slici 24. može se vidjeti prikaz procesa FCAW-S postupka zavarivanja sa svim bitnim dijelovima. [19]



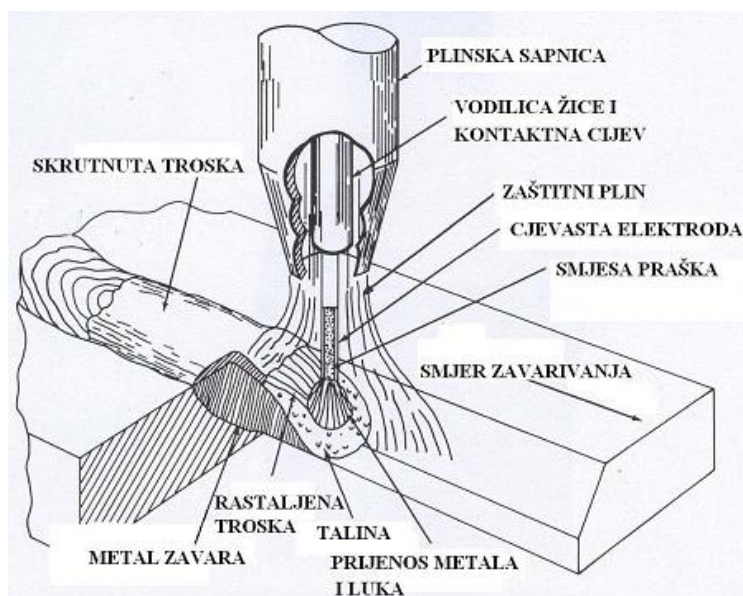
Slika 24. Prikaz procesa FCAW-S postupka zavarivanja [19]

2.2.3.2.2. FCAW-G postupak zavarivanja

Priprema spoja za FCAW-G postupak zavarivanja vrlo je slična pripremi spoja za REL postupak zavarivanja. Za osnovne konstrukcije sučeljenih spojeva treba razmotriti slijedeće:

- konstrukcija spoja treba biti takva da stalni slobodni kraj žice bude iste dužine i kada se zavaruje po nekoliko prolaza u spoju;
- spoj u koriјenu treba biti pristupačan i svaka dodatna operacija žicom tijekom zavarivanja treba biti omogućena.

Kutevi žljebova kod pripreme spoja raznih metala moraju biti propisno konstruirani kako bi omogućili pristup plinskoj sapnici pištolja i slobodnom kraju žice. Sapnice pokraj pištolja za automatsko zavarivanje omogućavaju lakši pristup uskim dijelovima spoja i omogućavaju manje kuteve pri pripremi spoja od aksijalnih sapnica. Uz pravilno izveden postupak zavarivanja postižu se kvalitetni zavari. Na slici 25. prikazan je proces FCAW-G postupka zavarivanja sa svim bitnim dijelovima [19].



Slika 25. Prikaz procesa FCAW-G postupka zavarivanja [19]

Za dobivanje kvalitetnog zavora potrebna je pripadajuća plinska zaštita, a protok ovisi o veličini sapnice, slobodnom kraju žice i uvjetima zavarivanja. Zavarivanje uz mirnu struju zraka zahtijeva 14-19 l/min plina, a kod gibanja zraka ili dužeg slobodnog kraja žice 26 l/min zaštitnog plina. Protok bočnih sapnica općenito je isti ili veći od protoka aksijalnih sapnica. Otvor sapnice mora se očistiti zbog kapljica koje se lijepe tijekom procesa zavarivanja uslijed štrcanja. Ako postoji jače strujanje zraka u području zavarivanja, npr. pri zavarivanju na otvorenom, treba koristiti zastore za štićenje zone zavarivanja i sprječavanja gubitka plinske zaštite [19].

2.2.3.3. Izvedba FCAW-a za mokro podvodno zavarivanje

Glavne prednosti implementacije zavarivanja praškom punjenom žicom odnose se na povećanje produktivnosti, bolja mehanička svojstva zavara te mogućnost automatizacije uz smanjeni udio vodika u zavaru. Današnji sustavi mogu se primjeniti za zavarivanje i rezanje samozaštićujućom (FCAW-S postupak) praškom punjenom žicom. Razvijeni su dodavači žice koji su potpuno uronjeni u vodu te se mogu koristiti do 40 m dubine. Radi eliminacije utjecaja hidrostatskog tlaka dodavač se puni vodom, pri čemu je samo kućište elektromotora zabrtvljeno i ispunjeno dielektričnom tekućinom zbog izolacije. Na slici 26. može se vidjeti jedan takav dodavač žice [20].



Slika 26. Dodavač žice za podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom [20]

Zahvaljujući kontinuiranoj dobavi žice zavarivanje nije razlomljeno kao kod REL postupka zavarivanja što doprinosi produktivnosti procesa i kvaliteti zavara. Izvor struje i upravljačka konzola kao i kod REL postupka zavarivanja nalaze se na suhom, na kopnu ili na brodu, te su preko kabela povezani s dodavačem žice i pištoljem za zavarivanje koji se nalaze pod vodom. Za zavarivanje se upotrebljavaju namoti žice mase do 3,5 kg koji se mogu mijenjati pod vodom. Koriste se izvori struje s ravnom karakteristikom koji mogu dati jakost struje električnog luka od 500 A pri 60%-tnoj intermitenciji. Kao i kod izvora za REL zavarivanje, ovi izvori moraju imati povišen napon praznog hoda od 60 V. Raspon debljina žica za ovaj postupak kreće se između 1.2 i 2.4 mm. Na kontrolnoj konzoli na suhom podešavaju se i mjere parametri zavarivanja, provjerava se ispravnost sustava i upravlja se dodavanjem žice. Ronioc-zavarivač u stalnoj je komunikaciji s tehničkom podrškom na suhom koja upravlja i podešava sve parametre. Na slici 27. prikazani su dobavljač žice, pištolj za zavarivanje te upravljačka konzola [20].



Slika 27. Oprema za zavarivanje praškom punjenom žicom [20]

Komparativna ispitivanja REL i FCAW postupka pokazala su da je pri zavarivanju lima debljine 14 mm moguće postići smanjenje troškova oko 40 %. Primjena praškom punjene žice pri mokrom podvodnom zavarivanju značajno podiže zahtjeve za opremu i izvore struje za zavarivanje tako da su potrebna daljnja istraživanja.

Pri odabiru izvora struje za podvodno zavarivanje potrebno je obratiti pažnju na slijedeće karakteristike [21]:

- 1) **Amplituda impulsa** definira trenutnu potražnju struje. Za zavarivanje pri atmosferskim uvjetima obično je definirana u jednostavnim eksponencijalnim i kvadratnim valnim oblicima, no za zavarivanje pod vodom potrebni su sustavi za složenijim oblicima amplituda impulsa.
- 2) **Trajanje impulsa** definira proteklo vrijeme između izmjene 2 impulsa. Kod termalnog pulsiranja, pri kojem se odvija značajno taljenje i hlađenje u različitim dijelovima impulsa ovo vrijeme traje od 100 do 1000 ms, a kod visoko-frekventnog pulsiranja za stabilizaciju električnog luka ova veličina iznosi < 1 ms.
- 3) **Dinamički odziv** definira stopu povećanja ili pada struje pri promjeni potražnje struje (pulsiranje struje).
- 4) **Frekvencijski odziv** odnosi se na sposobnost izvora struje u praćenju visoko-frekventnih oscilacija napona koje se događaju uslijed naglih promjena opterećenja. Nagle promjene opterećenja izvora struje posebno se događaju kod zavarivanja pri povišenom tlaku uslijed

nastalih turbulentnih strujanja u korijenu električnog luka. S povećanjem dubine na kojoj se zavarivanje odvija rastu i oscilacije u amplitudi i frekvenciji.

5) **Nagib izlazne karakteristike** definira za koliko će se promijeniti jakost struje pri jediničnoj promjeni u naponu zavarivanja. Pri zavarivanju u atmosferskim uvjetima ova promjena obično iznosi između 2 i 4 V za svakih 100 A. Kako bi se zadržala mogućnost stabilizacije električnog luka, promjena duljine električnog luka zahtjeva i promjenu u jakosti struje neovisno o vanjskom tlaku, i ta promjena odvija se prema $p^{0,5}$.

6) **Brzina odziva karakteristike** definira brzinu promjene jakosti struje u vremenu prema karakteristici izvora struje. Optimalna vrijednost promjene jakosti struje u vremenu iznosi $0,5 \pm 0,1$ A/ μ s. Ako je promjena jakosti struje veća od optimalne električni luk postane nestabilan. U slučaju da je brzina promjene jakosti struje manja optimalne to će imati loš utjecaj na prijelaz metala s dodatnog materijala (žice) na radni komad.

7) **Pulsiranje struje** zahtjeva da se za svaki dio impulsa specificiraju posebni nagibi karakteristike, kao i posebno određeno trajanje svakog dijela impulsa.

8) **Brzina odziva impulsa** definira brzinu promjene jakosti struje između različitih karakteristika. Pri zavarivanju pod povišenim hidrostatskim tlakom smanjena je tolerancija na bilo kakve varijacije u brzini promjene struje, a optimalna vrijednost iznosi $0,5 \pm 0,1$ A/ μ s.

9) **Parametri zavarivanja kratkim spojem** moraju biti pod posebnom kontrolom pri zavarivanju pod povišenom hidrostatskom tlaku, a kontroliraju se preko amplituda impulsa, stope povećanja i sniženja jakosti struje, trajanja impulsa, itd.

10) **Sinergijska kontrola parametara zavarivanja** mora biti posebno prilagođena uvjetima zavarivanja pri povišenom hidrostatskom tlaku.

Dobava dodatnog materijala i eventualno zaštitnog plina znatno je otežana na većim dubinama uslijed hidrostatskog tlaka. Međutim, upravo veća mogućnost varijacija dodatnog materijala i zaštitnog plina uz optimalizaciju parametara može znatno utjecati na kvalitetu zavarenih spojeva. Dokazano je da primjena zaštitnih plinova poput freona pri mokrom podvodnom zavarivanju taljivom elektrodom u plinskoj zaštiti (FCAW-G postupak) može znatno utjecati na kvalitetu zavara [22]. Međutim primjena takvih plinova nije dozvoljena zbog njihovih utjecaja na atmosferu. Istraživanja koja su provedena s dvostrukom metalnom ovojnicom pokazala su da se praškom punjenom žicom postižu i do 50% manje količine

difundiranog vodika u odnosu na zavarivanje REL postupkom. Uz to, područje regulacije parametara za određeni promjer praškom punjene žice je znatno šire u odnosu na određeni promjer elektrode što poboljšava operativno područje rada. Također, navedno je da kombinirana primjena zaštitnog plina i elektrode ne osigurava najbolje uvjete i zaštitu procesa što se može objasniti kolizijom mehanizama pri čemu se ovi međusobno poništavaju [23]. Za dobavu žice pri mokrom podvodnom zavarivanju može se koristiti i «push-pull» sustav. Ovisno o promjeru žice i parametrima, postignut je depozit od 2 do 6 kg/h nataljenog materijala što potvrđuje veću produktivnost FCAW procesa u odnosu na REL.

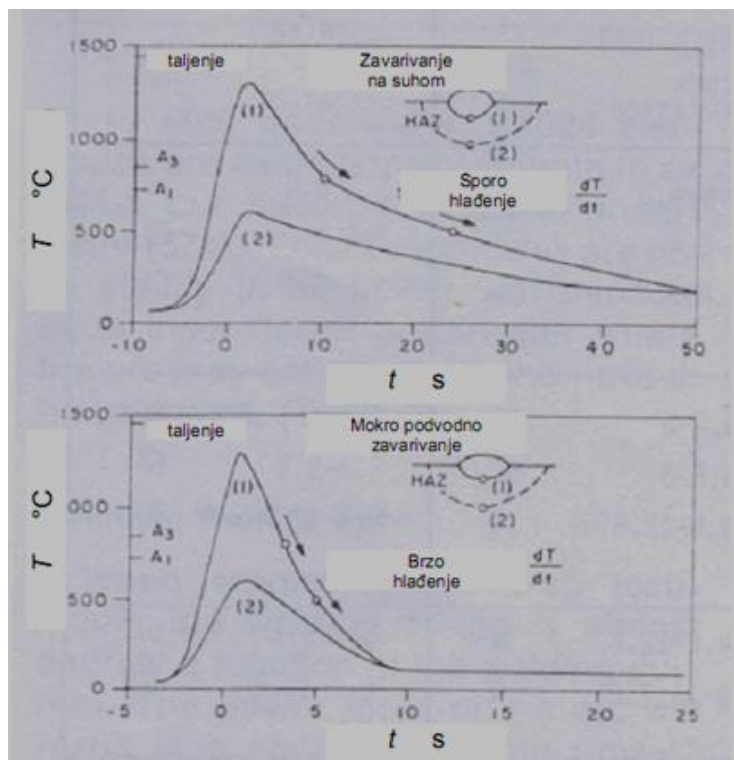
Razvijena je posebna formulacija zaštitnog praška za podvodno zavarivanje austenitnih čelika i čelika baziranih na niklu, a sastoji se od [24]:

1. 60% TiO
2. 10% ZrO
3. 5% SiO
4. 1% O/TiO (omjera 3:1)
5. 19% litijev silikat
6. 5% litijev karbonat

Navedena kompozicija praška smatra se optimalnom za mokro podvodno zavarivanje navedenih vrsta čelika kod kojih je bitno koristiti takve formulacije praška čijim izgaranjem neće nastajati halogeni elementi poput kalcijevog fluorida (CaF). Litijev karbonat može biti zamjenjen kalcijevim karbonatom ako je to potrebno, no ne preporuča se pošto litijev karbonat osigurava stabilnost električnog luka. Dokazano je da se troska koja nastaje izgaranjem navedene kompozicije da vrlo lako ukloniti [24].

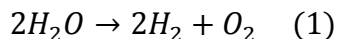
2.2.4. Greške i problemi pri mokrom podvodnom zavarivanju

Nemogućnost postizanja visoko-kvalitetnih zavora pri mokrom podvodnom zavarivanju direktna je posljedica vodenog okruženja. Direktna doticaj vode s električnim lukom i talinom metala zavora izaziva niz problema koji znatno narušavaju mehanička svojstva zavora. Zbog naglog hlađenja, koje je 4 do 5 puta brže nego pri zavarivanju na suhom dolazi do nastanka zavarenih spojeva s povišenom tvrdoćom. Brzo hlađenje taline rezultat je visokog specifičnog toplinskog kapaciteta vode te velike razlike u temperaturi između vode i taline. Zavareni spojevi dobiveni mokrim podvodnim zavarivanjem uslijed naglog hlađenja imaju određeni udio martenzita u svojoj mikrostrukturi što uzrokuje visoku tvrdoću, a nisku žilavost i čvrstoću. Zbog krhke i zakaljene strukture nastali zavareni spojevi podložni su pucanju. Tvrdoća u području zone utjecaja topline može doseći vrijednosti iznad 350 HV10. Vrijeme hlađenja taline između 800 i 500 °C ($t_{8/5}$), zavisno o parametrima zavarivanja i uvjetima okoline, iznosi između 2 i 4 sekunde dok kod zavarivanja na suhom vremensko trajanje hlađenja u tom temperaturnom području iznosi oko 16 sekundi. Na slici 28. prikazana je usporedba intenziteta hlađenja pri zavarivanju u normalnim uvjetima na suhom i pri mokrom podvodnom zavarivanju. [25]

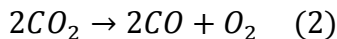


Slika 28. Brzina hlađenja taline pri suhom te mokrom podvodnom zavarivanju [25]

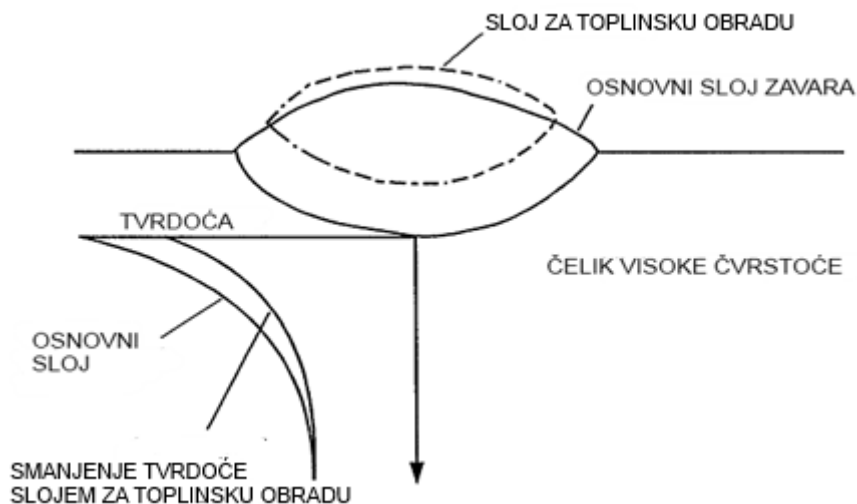
Kao što je prije bilo navedeno visoka temperatura električnog luka izaziva disocijaciju vode[25]:



Izgaranjem obloge elektrode doći će do izlučivanja ugljika koji zajedno sa kisikom tvori ugljični dioksid, koji također disocira prema reakciji:



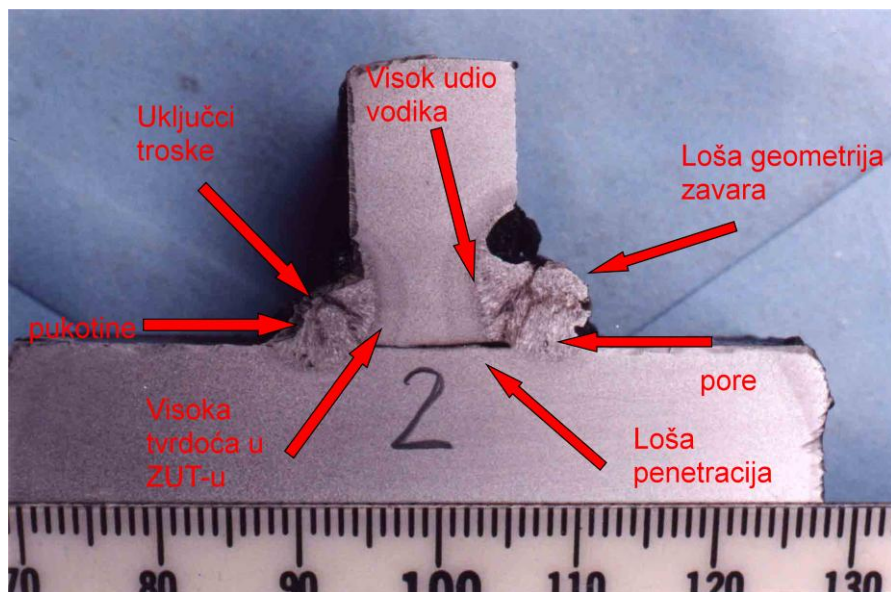
Prema navedenim reakcijama, kroz isparavanje i disocijaciju vode te izgaranjem obloge elektrode formiraju se sljedeći plinovi: 62-82% H_2 , 11-24% CO , 4-6% CO_2 i ostali udio čine O_2 i N_2 . Velika količina vlage uzrokuje povećavanu koncentraciju disociranog vodika u zavarenom spoju, te će nastali zavareni spoj imati 30 do 80 ml H_2 /100g zavara. Glavni izvor vodika u zavarenom spoju jest disocijacija okolne vode iako on također može biti rezultat vlage iz obloge elektrode. Na apsorpciju vodika, osim sastava obloge i parametara zavarivanja, znatno utječe i polaritet elektrode. Dokazano je da se manje vodika apsorbira u metal zavara ako je elektroda na negativnom polu. Zbog povišene koncentracije disociranog vodika u strukturi zavarenog spoja, tvrde i krhke mikrostrukture (bainitno-martenzitna), te velikih zaostalih naprezanja uslijed naglog hlađenja, nastali zavareni spojevi biti će podložni nastajanju hladnih pukotina. Ovome doprinose i brojne mikropukotine koje također nastaju uslijed naglog hlađenja taline zavarenog spoja, zbog čega plinovi u talini ne stignu difundirati u okolinu. Za smanjenje udjela difundiranog vodika koriste se posebne tehnike rada kojima se smanjuje brzina hlađenja te se provodi toplinska obrada prethodno nataljenih slojeva. Jedna od takvih tehnika bazire se na zavarivanju u više prolaza, tako da gornji sloj zavara toplinski obrađuje donji te pritom dolazi do otpuštanja vodika iz metala zavara. Na slici 29. može se vidjeti skica toplinske obrade kroz zavarivanje u više prolaza [15].



Slika 29. Sloj za toplinsku obradu zavarenog spoja [15]

Gotovo u svim zavarenim spojevima nastalim pod vodom doći će do lokalnog stvaranja martenzitne strukture uz liniju staljivanja. Širina ovog međusloja obično nije veća od 0.5 mm, a djeluje kao barijera difuziji vodika.

Plinovi koji nisu uspjeli difundirati iz taline zbog prenoglog hlađenja smanjuju mehanička svojstva nastalog zavarenog spoja te su potencijalni inicijatori pukotina. Porastom dubine raste i hidrostatski tlak koji može uzrokovati prodiranje vode u oblogu elektrode te slabija operativna svojstva električnoga luka. Visoki hidrostatski tlak uzrokuje suženje luka te povećani gubitak topline u okolinu. Ova pojava uzrokuje lošu geometriju zavora, uključke troske u zavaru, porozitet i nedovoljnu penetraciju. Iako bi zbog razlike u gustoći troska trebala isplivati na površinu, dio nje ostaje zarobljen u zavarenom spoju zbog prenoglog hlađenja te se time dodatno narušavaju mehanička svojstva zavarenoga spoja. Na slici 30. prikazane su karakteristične pojave grešaka na zavarima dobivenim mokrim podvodnim zavarivanjem [26].



Slika 30. Karakteristične greške pri mokrom podvodnom zavarivanju [26]

Zavareni spojevi dobiveni pod vodom u pravilu sadrže 90% vlačne čvrstoće i tek 50% duktilnosti u odnosu na zavarene spojeve dobivene pri suhim uvjetima zavarivanja. Zbog visokog udjela kisika u stupcu električnoga luka, dolazi do oksidacije i smanjenja legiranih elemenata u metalu zavora [12].

Smanjena vidljivost i mjehurići koji nastaju tijekom zavarivanja otežavaju praćenje procesa zavarivanja ronioncu-zavarivaču. U slučaju zavarivanja u slanoj vodi, sadržaj soli povećava veličinu kapljice rastaljenog metala u prijenosu s elektrode na osnovni materijal, ali se smanjuje broj kapljica. Slana voda može donekle utjecati na kvalitetu zavora, međutim to se ne može generalizirati. Istraživanja su pokazala da se kod zavarivanja u slanoj vodi, u odnosu na slatku vodu, smanjuje penetracija i presjek metala zavora, posebice ako postoji neizolirani dio u zavarivačkom krugu. Kabeli i držač elektrode su potencijalna mjesta nastanka «curenja» ili gubitka električne struje. To uzrokuje manje količine topline te se stoga struja zavarivanja za istu brzinu zavarivanja mora povećati za 10 - 20% u odnosu na zavarivanje na suhom. Osim toga, sadržaj soli u morskoj vodi stvara elektrolitički efekt koji znatno povećava stabilnost električnog kruga [27].

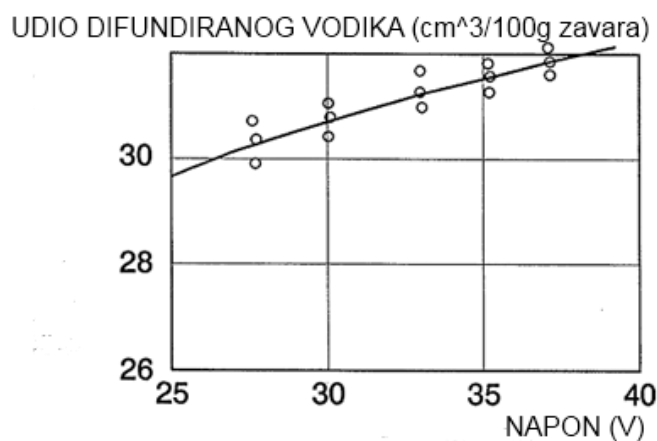
Prema iskustvima iz prakse, nelegirani konstrukcijski čelici s ekvivalentom ugljika CE između 0,35 i 0,4% te granicom tečenja ispod 345 N/mm^2 nisu osjetljivi na pojavu hladnih pukotina pri mokrom podvodnom zavarivanju. Pri mokrom podvodnom zavarivanju čelika s $\text{CE} > 0,4\%$ i granicom tečenja višom od 345 N/mm^2 moguće je koristiti austenitne dodatne

materijale zbog znatno više rastvorivosti vodika u FCC rešetki. S druge strane, austenitni dodatni materijali jako su osjetljivi na pojavu toplih pukotina pri skrućivanju. Osim austenitnih dodatnih materijala, zadovoljavajuću otpornost na pojavu hladnih pukotina pokazale su elektrode s oblogom od željeznog oksida. Pretpostavlja se da željezni oksid služi kao sakupljač vodike te time spriječava difuziju vodika na granice zrna i daljnje nastajanje i propagaciju pukotina. Elektrode sa željeznim prahom u oblozi tehnološki su inferiornije u odnosu na rutilne elektrode te mogu prouzročiti spoj između metalne jezgre i vode te tako stvoriti paralelni strujni tok koji ima za posljedicu smanjenje struje zavarivanja i probleme s održavanjem električnog kruga.

Svi navedeni problemi razlog su što se tehnike mokrog podvodnog zavarivanja smatraju lošima, međutim njihov status se mijenja u proteklih 10-tak godina intenzivnim razvojem novih tehnika rada, opreme, propisa i procedura zavarivanja.

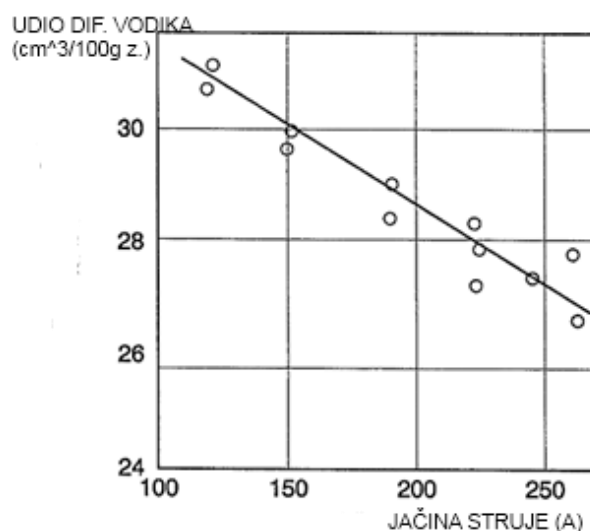
2.2.5. Utjecaj parametara zavarivanja na udio difundiranog vodika u zavarenom spoju

Istraživanja su pokazala da postoji veza između parametara zavarivanja (struja, napon, polaritet) i udjela difundiranog vodika u metalu zavara. Na slici 31. prikazan je utjecaj napona zavarivanja na rastvorivost vodika u metalu zavara pri zavarivanju REL postupkom zavarivanja [15].



Slika 31. Utjecaj napona zavarivanja na rastvorivost vodika [15]

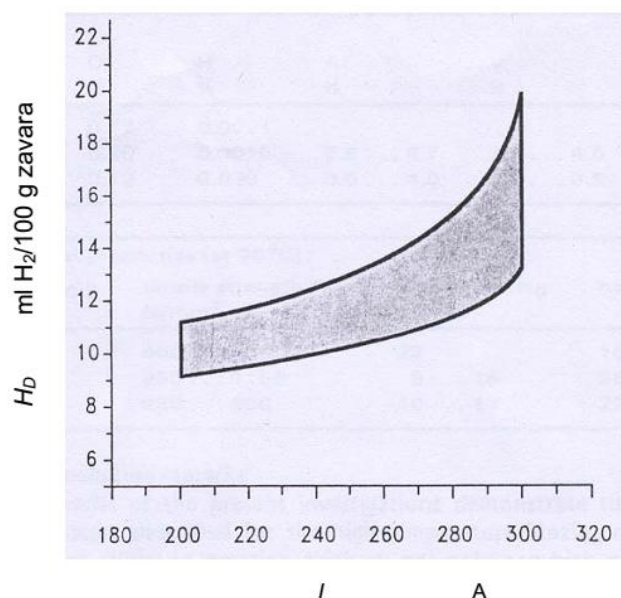
Na slici je vidljivo da porastom napona raste i udio vodika u metalu zavara. Ako je u pitanju struja zavarivanja, njezinim porastom udio difundiranog vodika u metalu zavara biti će manji, kako je prikazano na slici 32.



Slika 32. Utjecaj jačine struje na rastvorivost vodika [15]

Dakle zavarivanjem jakom strujom i niskim naponom udio vodika u metalu zavara biti će maksimalno reduciran. Tako da se pri većem unosu topline te odabirom negativnog polariteta udio vodika u zavarenom spoju smanjuje [11].

Na slici 33. može se vidjeti utjecaj struje zavarivanja na količinu difundiranog vodika pri mokrom podvodnom zavarivanju praškom punjenom žicom [23].



Slika 33. Utjecaj jačine struje na rastvorivost vodika pri zavarivanju PPŽ-om [23]

2.2.6. Primjena mokrog podvodnog zavarivanja

Primjena mokrog podvodnog zavarivanja je izrazita kod reparatura oštećenja ili rekonstrukcija podvodnih postrojenja. Moguće je vrlo brzo reagirati s obzirom na relativno malu količinu opreme i broj ljudi. Dosad je zabilježeno više stotina sanacija pukotina ili rekonstrukcija kod kojih je korišteno mokro podvodno zavarivanje. U proteklih 10-ak godina, status tehnike mokrog podvodnog zavarivanja u svijetu se znatno poboljšao. Tehnika mokrog podvodnog zavarivanja je opće prihvaćena i višestruko upotrebljavana pri održavanju plovnih objekata i “off-shore” postrojenja [26].

Mokro podvodno zavarivanje najčešće se primjenjuje kod [26]:

- “off-shore” objekata - platformi [Slika 34] i cjevovoda [Slika 35];
- energetskih postrojenja- nuklearne i konvencionalne elektrane;
- brana i mostova - nosači, konstrukcijski elementi;
- vodoopskrbe - cjevovodi, bazeni, crpne stanice;
- brodova - kormilo, trup, spremnici, brodski propeleri [Slika 36];
- industrijskih postrojenja - izmjenjivači topline, razni spremnici;
- podmornica - trup, kormila smjera i dubine;
- korozijske zaštite - izmjena cinkovih anoda [Slika 37].



Slika 34. Reparatura nosača platforme [28]



Slika 35. Zavarivanje prirubnice cijevi [28]



Slika 36. Zavarivanje propelera broda [28]



Slika 37. Izmjena cinkovih anoda [28]

2.3. Klase zavara u podvodnom zavarivanju prema AWS D3.6

Procedure i kvalifikacije za podvodno zavarivanje skupljene su u specifikaciji za podvodno zavarivanje AWS D3.6M:1999, koja uzima u obzir čimbenike podvodnog okruženja. Prema toj normi postoje četiri klase zavarenih spojeva koje se označavaju slovima: A, B, C i O. Zavareni spojevi klase A uspoređuju se sa zavarenim spojevima dobivenim na suhom prema vrijednostima određenih komparativnih svojstava te zahtjevima za testiranje. Ova klasa zavarenog spoja najteža je za realizaciju i prvenstveno se ostvaruje suhim tehnikama zavarivanja. Zavareni spojevi klase B namjenjeni su za manje kritične primjene, kod kojih se može dopustiti niža duktilnost, veliki porozitet i visok stupanj diskontinuiteta. Klasa C označava zavarene spojeve koji se primjenjuju tamo gdje stupanj opterećenja nije primaran. Svi zavareni spojevi koji moraju zadovoljiti zahtjeve neke druge norme ili specifikacije spadaju u klasu O. Specifikacija za podvodno zavarivanje AWS D3.6M:1999 u pravilu se dopunjava, popravlja te preuređuje svakih 5 godina kako bi se aktualizirala sa modernim tehnologijama. Jedan od osnovnih čimbenika za postizanje odgovarajuće kvalitete zavarenih spojeva jest pravilan odabir ronioca-zavarivača. Oni moraju biti vješti ronionci sa dobro uvježbanom tehnikom zavarivanja. Loša tehnika uzrokuje pojavu grešaka u zavarenim spojevima poput poroziteta ili povišenog udjela vodika u zavaru, a nepravilan nagib elektrode može izazvati uključenje troske u sam zavareni spoj. Osim odlične tehnike zavarivanja i vještine ronjenja potrebna je i visoka fizička spremna zavarivača. Iskustvo je pokazalo da zavarivači s odličnom fizičkom spremom mogu raditi pod vodom bez pauze maksimalno 4 sata. Duži rad od toga uzrokuje greške kod zavarivača uslijed nastalog umora. Kako bi se osigurala jedinstvena edukacija za sve ronioce-zavarivače diljem svijeta i u Europi razvili su se standardi za njihovu obuku i certificiranje [4].

3. Čelici povišene čvrstoće

3.1. Općenito o čelicima povišene čvrstoće

Cilj razvoja ovih čelika je postignuće više granice razvlačenja i više vlačne čvrstoće, pa time i višeg dopuštenog naprezanja u radu. Primjenom ovih čelika smanjuju se nosivi presjeci kod jednakih opterećenja, odnosno smanjuje se masa i volumen konstrukcije, što dovodi do sniženja ukupnih troškova konstrukcije. Kod strojeva i vozila manja masa znači i manji utrošak pogonske energije i smanjenje gubitaka uslijed inercijskih sila pri pokretanju i zaustavljanju. Pri razvoju čelika povišene čvrstoće nastojao se zadržati povoljan omjer R_e/R_m (0,70...0,85), što je tzv. "plastična rezerva", tako da u slučaju preopterećenja prije dolazi do plastične deformacije, a ne do loma materijala. Zadržavanjem niskih udjela ugljika te legirnih elemenata zavarljivost ostaje zadovoljavajuća [29].

Čelike povišene ili visoke čvrstoće treba primjenjivati uzimajući u obzir sljedeće činjenice [29]:

- kod nekih tlačno opterećenih konstrukcija tankih presjeka može se pojaviti povećano izvijanje, a kod savijanja veliki progib. To mogu biti dugačke mosne konstrukcije, dizalice, dugački brodovi i sl. Dakle, jasan je problem krutosti, odnosno stabilnosti konstrukcije. Krutost konstrukcije nije određena samo granicom razvlačenja, već poglavito modulom elastičnosti, koji je gotovo jednak za sve čelike. Zbog toga, pri navedenim uvjetima opterećenja, primjena ovih čelika ne donosi bitne prednosti;
- korozija dodatno smanjuje debljinu stijenke pa se s vremenom smanjuje nosivost presjeka i o tome se mora voditi briga pri dimenzioniranju presjeka;
- kod čelika povišene čvrstoće mehanička svojstva poput dinamičke izdržljivosti te otpornosti materijala na naglo širenje pukotina ne rastu proporcionalno s granicom razvlačenja. Dapače, ovi čelici su iznimno osjetljivi na zarezno djelovanje pa je potreban oprez kod primjene u uvjetima promjenjivog dinamičkog opterećenja;
- porastom granice razvlačenja opada deformabilnost, a raste osjetljivost prema pojavi krhkog loma.

Povišenje čvrstoće čelika ponajprije ovisi o mogućnostima modificiranja njegove mikrostrukture. Tako se čelici s jednofaznom feritnom ili austenitnom mikrostrukturom ne mogu očvrstnuti kaljenjem, ali su zato očvrstljivi precipitacijom (uz dodatak odgovarajućih

legiranih elemenata). Svi načini povišenja čvrstoće temelje se na otežanom gibanju dislokacija nastalim preprekama. Dislokacije su strukturne jednodimenzionalne nepravilnosti kristalne rešetke materijala, koje nastaju tijekom kristalizacije ili plastične deformacije. U malom broju dislokacije smanjuju čvrstoću materijala, no njihovim gomilanjem se čvrstoća naglo podiže.

Osnovni mehanizmi očvršnuća - povišenja granice razvlačenja su [29]:

I. Očvršnuće kristalima mješancima

Kristali mješanci nastaju kada atom legirnog elementa ulazi u kristalnu rešetku osnovnog metala. Strani atomi u rešetki željeza čine intersticijske ili supstitucijske kristale mješance, te predstavljaju zapreke gibanju dislokacija. Od svih mehanizama očvršnuća ovaj daje najslabije efekte.

II. Očvršnuće martenzitnom transformacijom

Kaljenje je toplinska obrada grijanja čelika s minimalno 0,35%C te mogućnošću feritno-austenitne pretvorbe na temperaturu austenitizacije te naglog gašenja. Pritom dolazi do preklopne pretvorbe austenita u martenzit čime se povisuje čvrstoća i tvrdoća čelika, a opada istezljivost i žilavost pa je nužno dodatno provesti popuštanje. Čelici koji su nakon kaljenja podvrgnuti visokotemperaturnom popuštanju nazivaju se poboljšani čelici.

III. Očvršnuće hladnom deformacijom

Deformiranjem čelika raste granica razvlačenja. Što je viši stupanj deformacije to će biti viša granica razvlačenja zbog toga što raste gustoća dislokacija. Pritom se žilavost znatno smanjuje.

IV. Očvršnuće granicama zrna, odnosno usitnjenjem zrna

Granice zrna predstavljaju dvodimenzionalne nesavršenosti kristalne rešetke, te se njihovim porastom povećava otpor gibanju dislokacija. Što je zrno sitnije, to su više vrijednosti čvrstoće i žilavosti materijala. Usitnjene zrna se obično kombinira s ostalim mehanizmima očvršnuća.

V. Očvršnuće izlučivanjem (precipitacijom) ili disperzijom faza

Radi se o izdvojenim fazama nelegiranih ili legiranih karbida ili ostalih prikladnih intermetalnih spojeva i prijelaznih faza iz homogene mikrostrukture ferita, austenita ili martenzita. Ove faze nastaju kada se prekorači granica topivosti stranih atoma u rešetci željeza. Djelovanje tih faza ovisi o njihovom rasporedu i vrsti.

Čelike povišene i visoke čvrstoće dijelimo u sljedeće skupine [29]:

- 1) sitnozrnati normalizirani čelici s feritno-perlitnom mikrostrukturom;
 $360 < R_{p0,2} < 500 \text{ N/mm}^2$;
- 2) poboljšani sitnozrnati čelici s mikrostrukturom popuštenog martenzita;
 $500 < R_{p0,2} < 1000 \text{ N/mm}^2$;
- 3) ultračvrsti čelici; $R_{p0,2} > 1000 \text{ N/mm}^2$;

3.2. Proizvodnja čelika povišene čvrstoće

Čistoća čelika i optimalni kemijski sastav od velike su važnosti za ispunjavanje zahtjeva koji se postavljaju na cjevovode. Što se tiče čistoće, postavljaju se zahtjevi za što manjim udjelom sumpora kako bi se osigurala veća lomna čvrstoća čelika i izbjegavanje uključaka aluminijevog oksida u blizini zavarenog spoja. Vrlo je bitno pri proizvodnji voditi računa o što nižem udjelu nečistoća u čeliku.

Glavna linija proizvodnje traka čelika za cjevovode je postupak kontroliranog termomehaničkog valjanja koji je najučinkovitiji kada se primjenjuje na mikrolegirane čelike koji imaju povišenu temperaturu rekristalizacije. Izraz termomehanički znači da se plastična deformacija odvija prije ili za vrijeme strukturne pretvorbe materijala. Postupak termomehaničkog valjanja podijeljen je u nekoliko koraka koji su zaslužni za konačna svojstva materijala.

3.2.1. Predgrijavanje

Od velike je važnosti temperatura predgrijavanja i prisutnost nerastvorenih čestica karbida. Cilj predgrijavanja je postizanje jednolike raspodjele topline po pločama lima i potpuno rastvaranje karbida i nitrida. Tanke ploče griju se jednoliko u visokim pećima. Iznos temperature predgrijavanja ovisi o sastavu mikrolegiranih elemenata u čeliku. Za čelike povišene čvrstoće mikrolegirane niobijem, raspon temperature predgrijavanja iznosi od 1150 do 1250 °C. Čestice TiN ostati će nerastvorene pri tim temperaturama.

3.2.2. Grubo mehaničko valjanje

Cilj grubog termomehaničkog valjanja je postizanje najfinije moguće austenitne strukture prije postizanja temperature rekristalizacije. Iznad temperature A_3 dolazi do rekristalizacije i očvršćivanja zrna. Faza grubog termomehaničkog valjanja za čelike X60 i X80 završava na približno 1030 °C. U tu svrhu se primjenjuju specijalno razvijene

redukcijske metode s česticama titanovih nitrida (TiN) koje spriječavaju rast rekristalizacijskog austenitnog zrna. Za većinu čelika za cjevovode temperatura grubog mehaničkog valjanja iznosi od 950 do 1200 °C.

3.2.3. Završno termomehaničko valjanje

Svrha ove faze proizvodnje je akumulacija naprezanja pri valjanju u temperaturnom području ispod temperature A_3 , gdje još nije nastupila rekristalizacija austenitnog zrna. Time nastaje feritna struktura. U toj temperaturnoj zoni dolazi do precipitacije niobijevih nitrida (NbN) uslijed smanjene topivosti Nb u austenitu. Austenitno zrno se pritom izdužuje. Početna temperatura kontroliranog termomehaničkog valjanja iznosi od 1050 do 950 °C i završava na temperaturi 730 do 1000 °C, što uvelike ovisi o kemijskom sastavu, tj. udjelu mikrolegiranih elemenata i o uvjetima proizvodnje.

3.2.4. Snažna redukcija debljine lima

Snažna redukcija (od 60 do 85%) za vrijeme kontroliranog procesa termomehaničkog valjanja povećava granicu razvlačenja bez nepovoljnog djelovanja na prijelaznu temperaturu. Prijelazna temperatura jest ona temperatura pri kojoj žilavost materijala pada ispod 27 J prema Charpy-u, tj. pri kojoj materijal iz žilavog stanja prelazi u krhko stanje. Snažna redukcija rezultira usitnjavanjem zrna.

3.2.5. Režim hlađenja

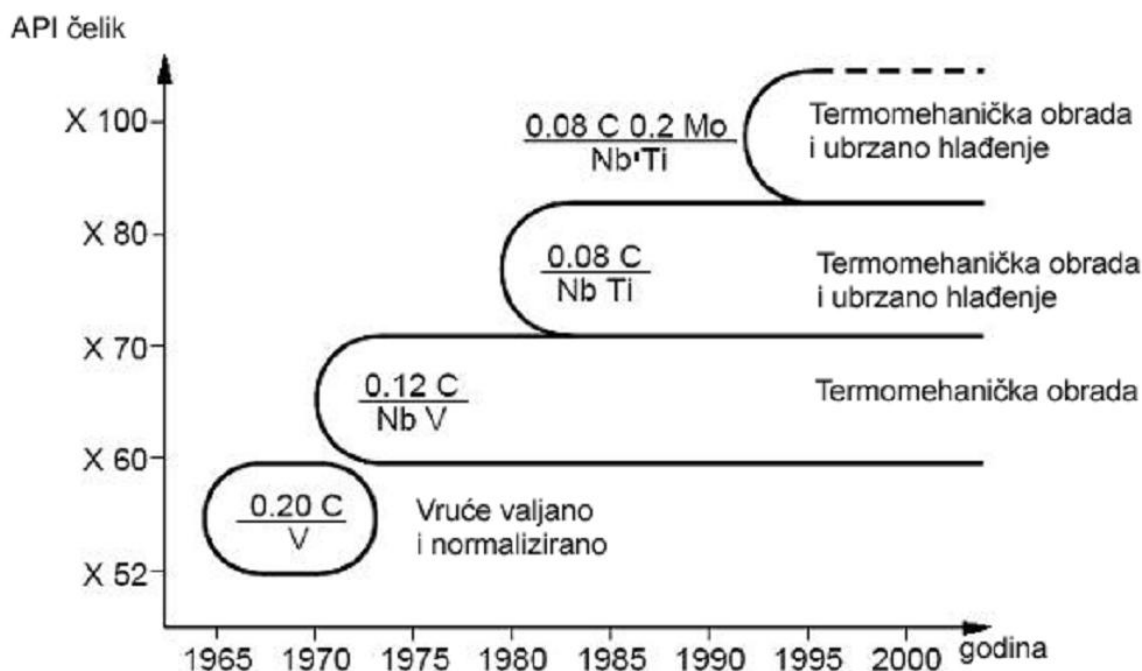
Režim hlađenja vrlo je bitan s aspekta postizanja optimalne čvrstoće. Kontroliranim hlađenjem regulira se promjena mikrostrukture, usitnjavanje feritnog zrna te precipitacijsko očvršćivanje. Brzo hlađenje utječe na povećanje volumena bainita ili M/A strukture ili igličastog ferita.

3.2.6. Temperatura namatanja

U ovoj fazi ne dolazi do promjene strukture materijala, ali je ona vrlo bitna za precipitacijsko očvršćivanje, stoga je potrebno kontrolirati iznos temperature da bi se postigao maksimalan efekt. TiC, TiN, NbC te VC precipitiraju u feritu za vrijeme hlađenja. Temperatura bi trebala biti što niža za fino očvršćivanje karbida i nitrida u feritu, međutim ne smije biti ni preniska kako se nebi smanjio udio TiC zbog prespore difuzije. Ukoliko je temperatura namatanja preniska, precipitacija je oslabljena što krajnje rezultira niskim iznosom čvrstoće materijala.

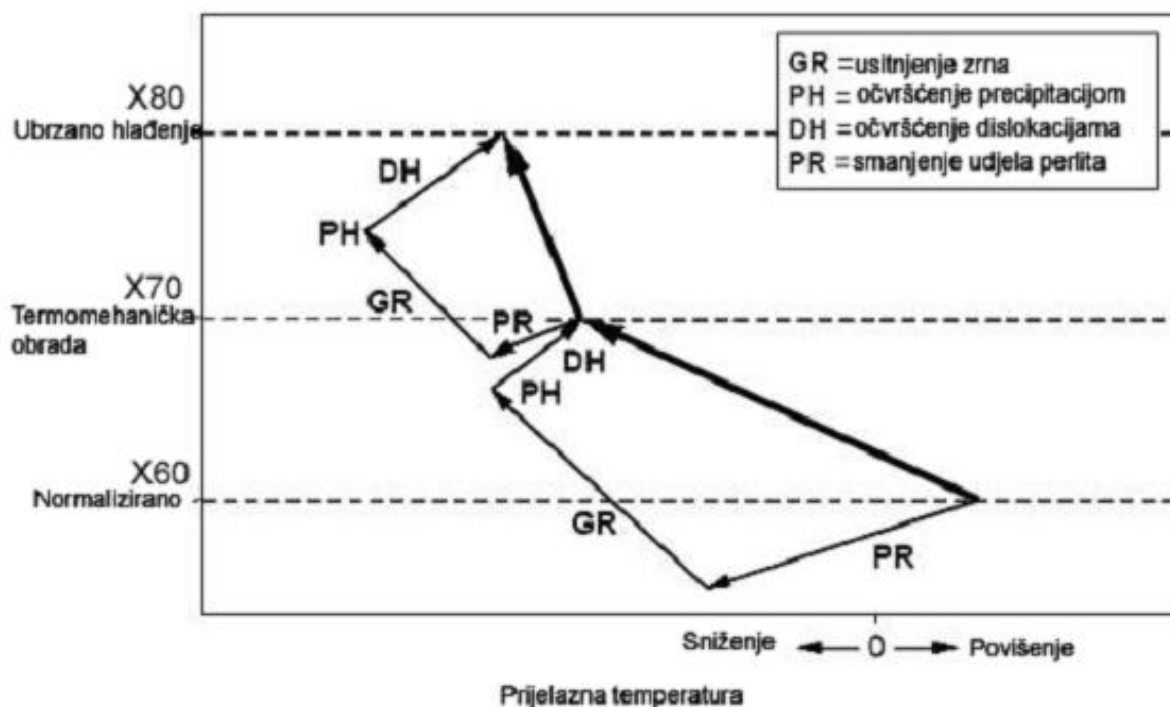
3.3. Razvoj čelika visoke čvrstoće API 5L X80

Kao materijal za izradu cjevovoda za prijevoz nafte i plina danas se najčešće koriste čelici gradacije X70 i X80 prema specifikaciji za cjevovode API 5L. Cjevovodi velikih promjera transportiraju 75% svjetske proizvodnje prirodnog plina i to na najekonomičniji i najsigurniji način. Smanjenjem udjela ugljika ispod 0,1%, mikrolegiranjem s Al, Nb i V te pravilnom toplinskom obradom postiže se fina sitnozrnata struktura odličnih mehaničkih svojstava. Razvojem mikrolegiranja te unapređenjem termomehaničke obrade uz ubrzano hlađenje dobiveni su čelici gradacije X80 povećane čvrstoće. Na slici 38. prikazan je razvoj čelika visoke čvrstoće tijekom prošlog stoljeća [13].



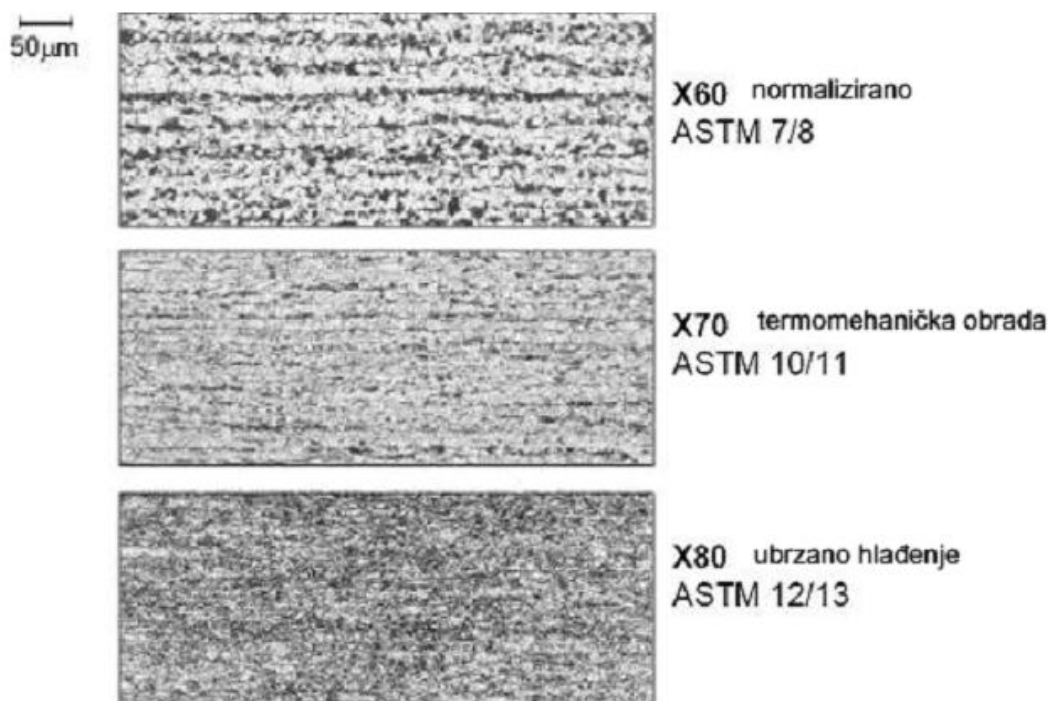
Slika 38. Razvoj čelika visoke čvrstoće [13]

Mehanička svojstva čelika određena su mikrostrukturnim značajkama poput granica zrna, precipitata i dislokacija. Kod niskolegiranih čelika se navedeni mehanizmi odvijaju tijekom transformacije austenita pri hlađenju, na što se utječe brzinom hlađenja i završnom temperaturom hlađenja. Na slici 39. prikazano je kako se spomenutim mehanizmima očvršćivanja dobijaju čelici gradacije X60, X70 i X80.



Slika 39. Mehanizmi očvršćivanja za čelike X60, X70 i X80 [13]

Čelici gradacije X60 su normalizirani i uobičajeno sadrže 0,2% ugljika, 1,55% vanadija, 0,03% niobija i 0,02% dušika. Kod čelika X70 udio ugljika smanjen je na 0,12% i manje, ali je primjenjena termomehanička obrada što je rezultiralo smanjenjem feritnog zrna. Usitnjavanjem zrna istovremeno se povećava čvrstoća i snižava prijelazna temperatura. Gubitak čvrstoće nastao smanjenjem udjela perlita nadomješten je precipitacijskim očvršnućem i dislokacijama, dok je bez obzira na strukturne promjene zadržana dobra zavarljivost i prihvatljiva prijelazna temperatura iz žilavog u krhko stanje. Daljnji razvoj prema gradaciji X80 dobiven je isključivo promjenom feritno-perlitne strukture u feritno-bainitnu. Kod čelika X80 još je više smanjen udio ugljika, usitnjeno je zrno te je povećana gustoća dislokacija. Na slici 40. prikazane su karakteristične mikrostrukture X60, X70 i X80 čelika. Čelik X60 ima normaliziranu trakastu feritno-perlitnu strukturu veličine zrna po ASTM 7/8, struktura čelika X70 je ujednačenija, a zrno veličine po ASTM 10/11, dok čelik X80 ima feritno-bainitnu strukturu veličine zrna STM 12/13 [13].



Slika 40. Tipične mikorstrukture čelika X60,X70 i X80 [13]

Kod termomehanički valjanih čelika utjecaj mikrolegiranih elemenata se očituje u sklonosti vezivanju sa dušikom i ugljikom. Važno je razumjeti mehanizme vezivanja jer se prema njima razvijaju mikrolegirani čelici. Tako, niža temperatura završnog valjanja dovodi do znatnog smanjenja broja i veličine precipitiranih karbonitrida, što se nemože reći za titanove karbonitride kod kojih nije ustanovljen utjecaj završne temperature valjanja. Temperatura rastvaranja karbida se znatno snizuje zbog prisustva zaostalog dušika. Kod ponovnog zagrijavanja pri valjanju određena količina Nb se rastvori za razliku od Ti nitrida. Pri termomehaničkom valjanju u području donjeg austenita dolazi do stvaranja finih čestica Nb precipitata što rezultira sitnijim austenitnim zrnom, a što doprinosi čvršćoj feritnoj strukturi.

3.4. Problematika zavarivanja visokočvrstih čelika u industriji

Nizak sadržaj ugljika, te mikrolegirni elementi niobij, titan i vanadij, uz odgovarajući termomehanički režim obrade, rezultiraju dobrim mehaničkim svojstvima. Moraju se intergrirati i zadovoljiti kombinacija visoke čvrstoće, žilavosti, zavarljivosti kao i visoka otpornost pojavi hladnih pukotina. Kod ovih vrsta čelika, visoka čvrstoća je rezultat kombinacije raznih mehanizama očvršćivanja: veličina zrna, dislokacije i precipitacijsko očvršćivanje u čvrstoj otopini. Mikrolegirni elementi imaju ključnu ulogu u dobivanju dobrih svojstava. Titan tvori čestice TiN na povišenim temperaturama, čime se izbjegava povećanje zrna kod višestrukih ciklusa grijanja i hlađenja, te dodatno pridonosi precipitacijskom očvršćivanju na nižim temperaturama, tvoreći fine čestice ugljikonitrida. Niobij utječe na brzinu rekristalizacije kod završnih valjanja, čime se promovira stvaranje finog ferita kod austenitno-feritne preobrazbe. Vanadij povećava čvrstoću precipitacijom sitnih i koherentnih karbida u feritnu matricu. Shodno razvoju osnovnog materijala, razvijeni su i dodatni materijali. Jedno od pitanja koje se postavlja - jesu li mehanička svojstva zavara, tj. treba li metal zavara imati bolja mehanička svojstva od osnovnog materijala. Prema određenim standardima, npr. API 1104, zahtjev je da vlačna čvrstoća metala zavara odgovara donjoj granici vlačne čvrstoće materijala cijevi. Također, mora se napomenuti da je veće naprezanje u uzdužnom zavaru cijevi, te se zbog toga u istom standardu specificira da vlačna čvrstoća bude veća od čvrstoće osnovnog materijala cijevi. Osim toga, ako se radi celuloznim elektrodama, mehanička svojstva metala zavara su na donjoj granici, te se celulozna elektroda preporučuje samo za korijenski i vrući prolaz. Popuna i završni sloj moraju se finalizirati bazičnim elektrodama s niskim sadržajem vodika, tzv. «low-hydrogen» elektrode ili praškom punjenom žicom. Granična mehanička svojstva korijena se još mogu i tolerirati s obzirom da metal zavara većinom čine popuna i završni prolazi. Kod mehaniziranog zavarivanja, brzine rada su dosta visoke, pa su zbog toga i brzine hlađenja veće, tako da treba obratiti pozornost na optimalan unos topline. Kritična donja granica unosa topline za zavarivanje čelika, koja se često navodi je 0,7 kJ/mm za debljinu stijenke 10 mm. Ako je unos topline ispod te granice, velika je vjerojatnost pojave pukotina. Zbog velike brzine hlađenja u ZUT-u, velika je vjerojatnost da će, ako se radi celuloznim elektrodama ili neprimjerenom tehnologijom, doći do povišenja sadržaja vodika te nastanka pukotina. Kako bi se smanjila mogućnost nastanka hladnih pukotina i da bi se povećale brzine hlađenja, te produžilo vrijeme da vodik izađe iz metala zavara, spoj cijevi se predgrijava. Osim toga, predgrijavanje nosi mnogo pogodnosti, kao npr. sušenje vlage s područja pripremljenog spoja, izgaranje eventualnih nečistoća,

smanjenje brzine hlađenja te smanjenje zaostalih naprezanja. Međutim, predgrijavanje predstavlja dodatni trošak, dok se kod prekomjernog predgrijavanja narušavaju svojstva čelika i metala zavora. Temperature predgrijavanja ne trebaju prelaziti više od 250 °C. Minimalna međuprolazna temperatura mora odgovarati temperaturi predgrijavanja. Ako se prilikom zavarivanja provodi tehnološka disciplina, pazi se na unos energije, temperaturu predgrijavanja, međuprolaznu temperaturu i tehniku rada, zavoreni spoj će imati optimalna mehanička svojstva [30].

3.5. Specifični postupci za zavarivanje cjevovoda

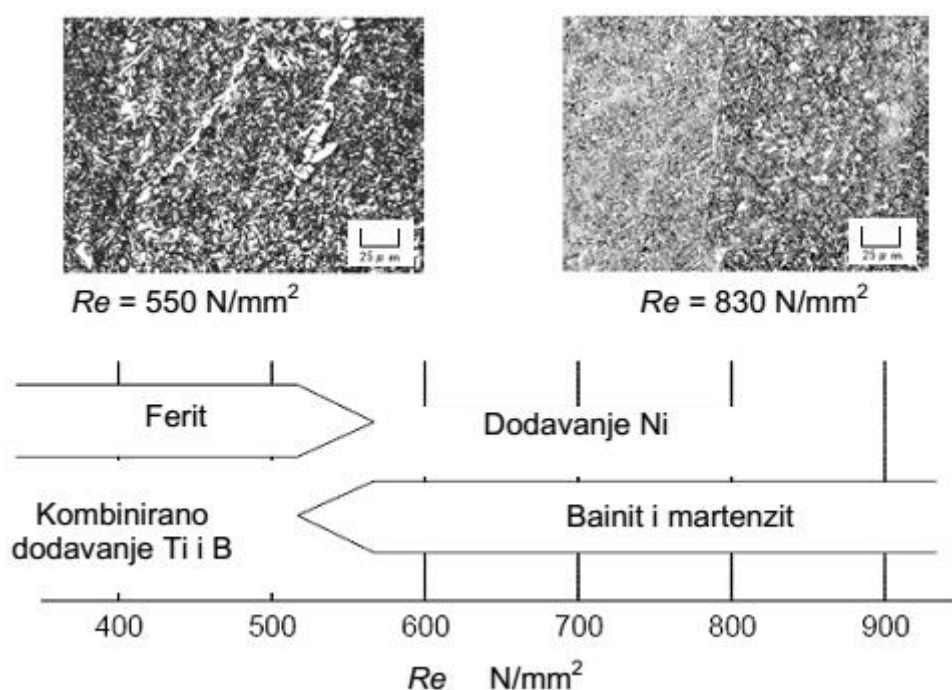
S obzirom na tehnološke i operativne parametre, te primjenjivost i dostupnost u praksi, za zavarivanje visokočvrstih čelika se najviše koriste sljedeći postupci [30]:

- REL zavarivanje (111) - zbog svoje visoke prilagodljivosti predstavlja uvijek dostupnu opciju. Primjenjivo je za sve vrste materijala, a nisu potrebni posebni alati i oprema. Najčešće su kombinacije REL zavarivanja korijena celuloznim, te popuna bazičnim ili celuloznim elektrodama;
- MAG zavarivanje (135) - konvencionalni i modificirani MAG postupak s kontroliranim prijenosom ima dobre operativno-tehnološke značajke potvrđene u praksi. Također, u usporedbi s REL postupkom potrebno je kraće vrijeme za obuku zavarivača;
- FCAW-G (136) - za zavarivanje popune i završnih prolaza koristi se zavarivanje praškom punjenom žicom, i to u kombinaciji sa zaštitnim plinom, jer daje dobru produktivnost i visoku kvalitetu zavora.

Primjena automatizacije prvenstveno ovisi o veličini i karakteru projekta. Drugim riječima, automatski postupci zavarivanja prihvatljivi su kod izrade velikih projekata ili kada su u pitanju posebni zahtjevi s obzirom na kvalitetu i sl. Također automatski postupci zavarivanja zahtijevaju bitno veća financijska ulaganja i logističku podršku [30].

3.6. Razvoj mokrog podvodnog zavarivanja čelika visoke čvrstoće

Razvoj čelika povišene čvrstoće paralelno prati i razvoj dodatnih materijala za zavarivanje pri čemu se, posebno za odobalne strukture, zbog hladnoće i dinamičkih opterećenja, traže visoke vrijednosti udarne radnje loma, niske prijelazne temperature i dovoljna vlačna čvrstoća. U razvoju dodatnih materijala najbolja svojstva se dobivaju primjenom praškom punjenih žica jer je moguće provesti mikrolegiranje iz praška. Mikrolegiranje borom, titanom i vanadijom te smanjivanjem udjela kiska postižu se tražena svojstva zavarenih svojstva. Na slici 41. može se vidjeti razvoj dodatnih materijala za zavarivanje čelika visoke čvrstoće.



Slika 41. Metode legiranja za povećanje čvrstoće metala zavara [25]

Vidljivo je da se pomicanjem podvodnih struktura na veće dubine i u hladnija podneblja postavljaju rigorozni zahtjevi na čvrstoću i udarnu radnju loma pri čemu se nužno moraju zadovoljiti uvjeti dobre zavarljivosti. Međutim, predviđa se da kod podvodnih struktura, osim proizvodnih zavarivanja koja se provode na suhom i u normalnim uvjetima, sve češće bilježe i podvodno reparaturno ili montažno zavarivanje što donosi novi niz problema. Iako se visokočvrsti čelici smatraju izvrsno zavarljivima u normalnim uvjetima, pri mokrom podvodnom zavarivanju uz ubrzano hlađenje cilj je dobiti mikrostrukture koje imaju veću otpornost na pojavu i propagaciju pukotina. Za to je nužno razviti adekvatne tehnologije zavarivanja i dodatne materijale [25].

3.7. Zavarljivost čelika visoke čvrstoće mokrim podvodnim zavarivanjem

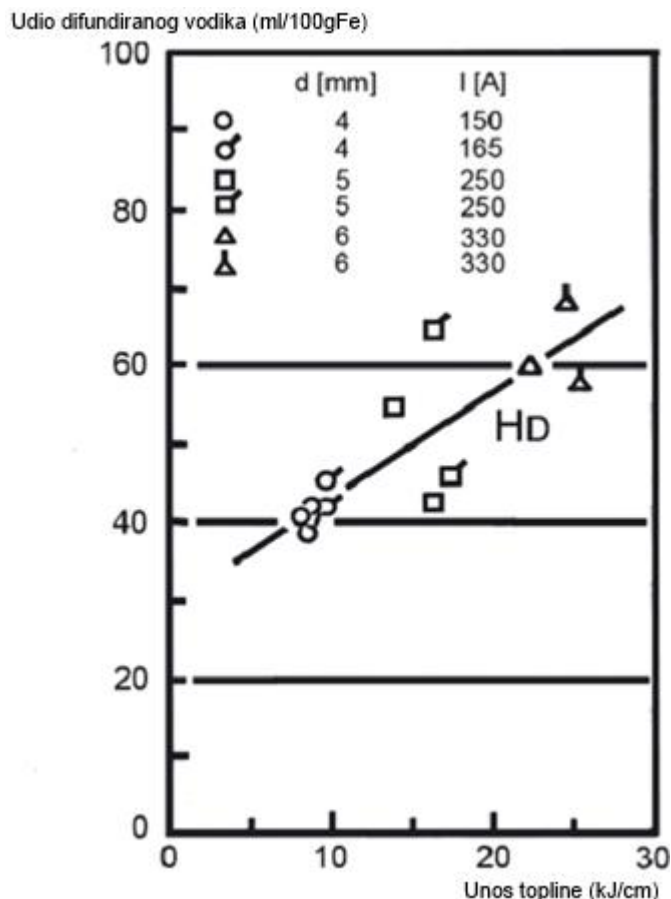
Kao što je u prethodnim poglavljima bilo navedeno, podvodno zavarivanje može biti mokro ili suho, koje se još može podijeliti na hiperbaričko ili lokalno. Postoji cijeli niz postupaka zavarivanja koji se koriste u industriji, a njihova primjenjivost za podvodno zavarivanje analizirana je u tablici 2. [31].

Tablica 2. Mogućnost upotrebe zavarivačkih postupaka u vodenoj okolini [31]

POSTUPAK	HIPERBARIČKO ZAVARIVANJE	MOKRO ZAVARIVANJE	LOKALNO SUHO ZAVARIVANJE
REL (111)	DA	DA	MOGUĆE
EPP (121)	DA	DA	NE
MIG/MAG (131/135)	DA	MOGUĆE	DA
FCAW (136/138)	DA	DA	DA
FCAW-S (114)	MOGUĆE	DA	MOGUĆE
PLAZMA (15)	MOGUĆE	NE	MOGUĆE
LASER (521)	MOGUĆE	NE	DA
Z. TRENJEM (42)	DA	DA	NE
Z. EKSPLOZIJOM (441)	NE	DA	NE
Z. SVORNJAKA (78)	MOGUĆE	DA	MOGUĆE

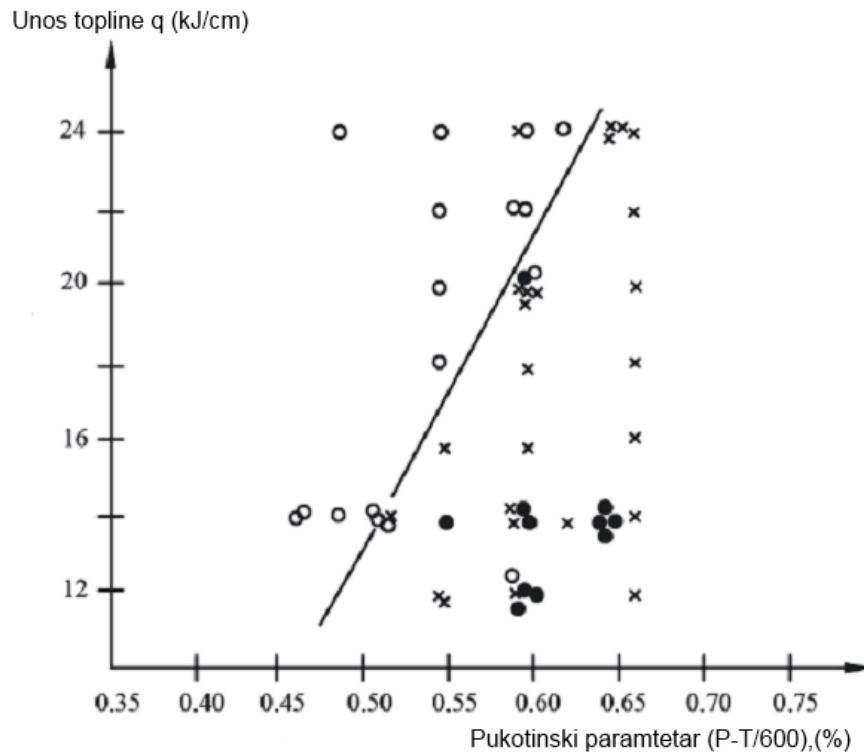
Među postupcima primjenjivim za mokro podvodno zavarivanje najčešće je korišteno REL zavarivanje, stoga se procjena zavarljivosti čelika visoke čvrstoće mokrim podvodnim zavarivanjem prvenstveno bazire na tom postupku.

Zavarivanje u vodenoj okolini rezultira visokim udjelima difundiranog vodika u metalu zavara te velikim brzinama hlađenja zavarenog spoja. Zavarivanjem REL postupkom zavarivanja metal zavara sadržavati će i 30 do 80 ml H_2 /100g zavara, zavisno o uvjetima zavarivanja te korištenom dodatnom materijalom. Dosadašnja istraživanja pokazala su da je odlučujući faktor za količinu difundiranog vodika u metal zavara pri mokrom podvodnom zavarivanju unos topline. Na slici 42. prikazan je utjecaj unosa topline na količinu difundiranog vodika u metal zavara pri mokrom podvodnom REL zavarivanju [31].



Slika 42. Utjecaj unosa topline na količinu difundiranog vodika [31]

Brzina hlađenja metala zavara pri mokrom zavarivanju veća je 4 do 5 puta nego pri zavarivanju na suhom što uzrokuje stvaranje tvdrih i krhkih struktura te velikih zaostalih naprežanja na području ZUT-a. Ova pojava posebno je opasna kod čelika visoke čvrstoće jer su oni u pravilu i krhkiji od običnih mekih konstrukcijskih čelika. Uslijed djelomično ili potpuno martenzitne strukture, visokog udjela vodika u metalu zavara, te visokih zaostalih naprežanja na zavarenim spojevima nastalim u vodi uobičajena pojava su hladne pukotine. Pukotine se javljaju čak i kod čelika s ekvivalentom ugljika $Ce \leq 0,3 \%$. Uslijed brzog hlađenja u području ZUT-a nastaju strukture tvrdoće i do 350–400 HV, što uz vodik u metalu zavara uzrokuje nastanak velikog broja mikropukotina. Na slici 43. prikazani su rezultati ispitivanja Tekken metodom, koji su se koristili za razvoj jednadžbe kojom bi se približno mogao odrediti minimalan unos topline pri kojem nebi došlo do nastanka hladnih pukotina. Na dijagramu 'o' označava da nije došlo do pojave pukotina, 'x' označava da je došlo do pojave unutarnjih pukotina, a '●' označava da je došlo do pojave unutarnjih i vanjskih pukotina.



Slika 43. Rezultati Tekken metode, mokro podvodno REL zavarivanje [31]

Pomoću rezultata sa slike 43 razvijena je jednačba slijedećeg oblika:

$$q = 200 \times \left(P - \frac{T}{600} \right) - 67 \quad (3)$$

gdje je: q - unos topline, kJ/cm

T – početna temperatura, °C

$$P = Ce + H_D/60 + R/200000$$

Ce - ekvivalent ugljika prema IIW-u, %

H_D - količina difundiranog vodika u metalu zavora, ml/100gFe

R - intenzivnost zaostalih naprezanja, N/mm²

Postoji veliki broj faktora koji utječu na učestalost pojave hladnih pukotina pri mokrom podvodnom zavarivanju, stoga je teško formulirati uvjete i recept kojim bi se sigurno spriječio njihov nastanak.

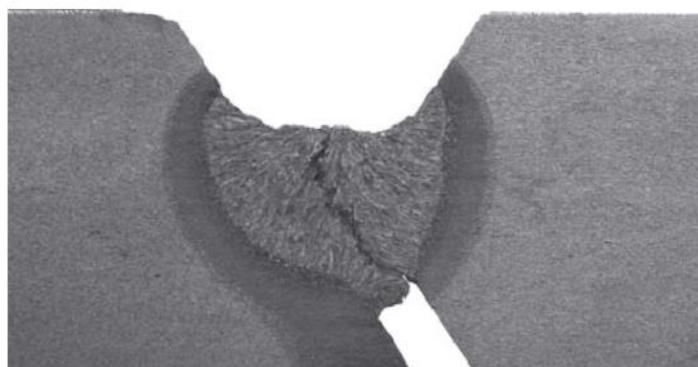
Na temelju svih dosadašnjih istraživanja mogu se formulirati 2 osnovna kriterija koja sprječavaju nastanak hladnih pukotina kod nelegiranih čelika, a to su [32]:

- koristiti osnovni materijal s ekvivalentom ugljika: $Ce < 0,30 \%$
- koristiti unos topline veći od $1,5 \text{ kJ/mm}$

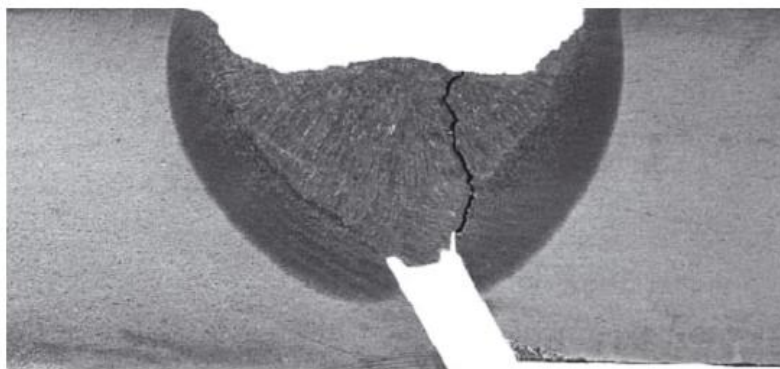
U slučaju uporabe austenitnih elektroda moguće je postići kvalitetne zavarene spojeve i kod osnovnih materijala s višim ekvivalentom ugljika, s Ce i do $0,40 \%$. No, u ovom slučaju postoji visoka vjerojatnost nastanka toplih pukotina. Osim austenitnih elektroda, veća žilavost se pri mokrom podvodnom zavarivanju može postići i korištenjem elektroda legiranih s niklom. Smatra se da je optimalni sadržaj nikla u metalu zavora $\sim 2 \%$. [31]

Postoji još jedna metoda koja se smatra dosta efikasnom u postizanju boljih svojstava zavarenih spojeva pod vodom, a to je toplinska obrada metala zavora zavarivanjem u više prolaza. Naime, pri zavarivanju na suhom u svrhu razgradnje zaostalih naprezanja i postizanja bolje žilavosti zavarenog spoja izvodi se toplinska obrada popuštanja zavora na temperaturama $400 - 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ u trajanju od nekoliko sati. Ovakva obrada zavora nije moguća pod vodom, no zavarivanjem u više prolaza moguće je popustiti zavareni spoj te postići nešto niže vrijednosti tvrdoće, tj. bolju mikrostrukturu zavarenog spoja.

Do sada su provedena ispitivanja zavarljivosti čelika visoke čvrstoće S355J2G3 i S500M mokrim podvodnim zavarivanjem. Tijekom ispitivanja niti jedan od uzoraka nije postignut bez nastanka pukotina. Karakteristične pukotine metala zavora mogu se vidjeti na slikama 44. i 45. [31].



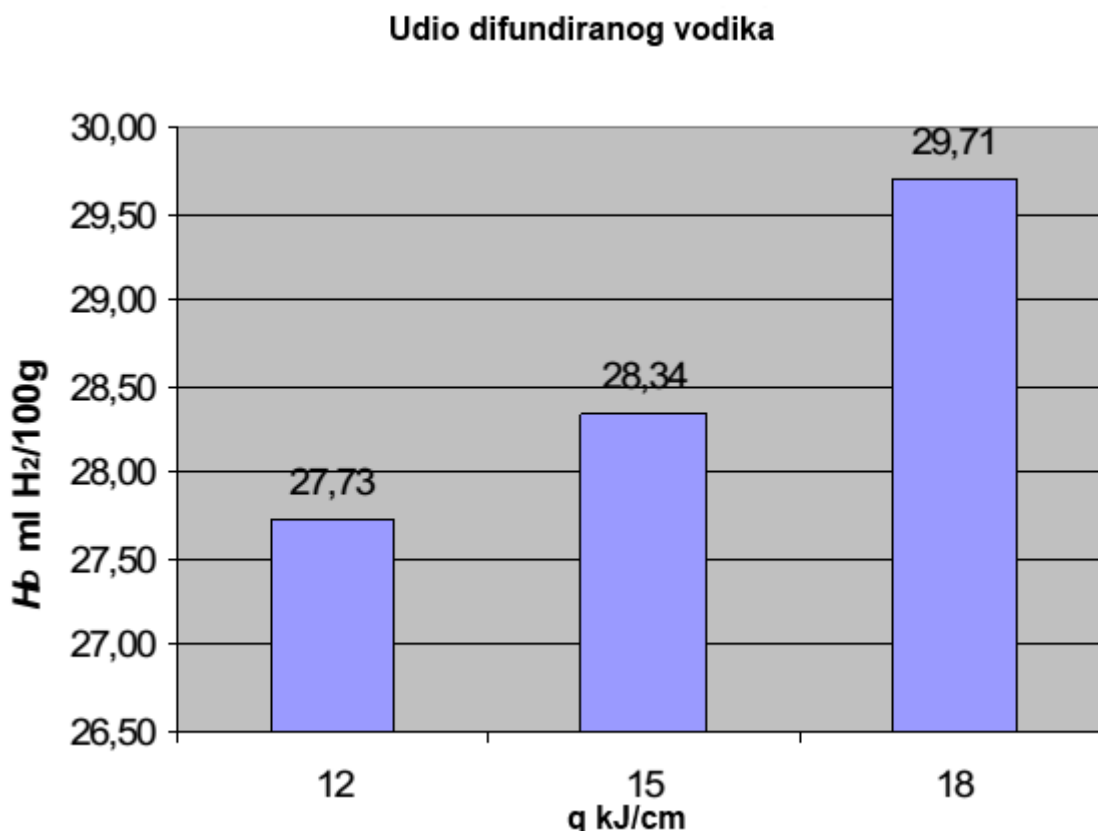
Slika 44. Pukotina u presjeku zavora ispitnog uzorka S500M [31]



Slika 45. Pukotina u presjeku zavora S355J2G3 [31]

Za zavarivanje oba materijala korištene su elektrode s rutilnom prevlakom, čijom se uporabom nemože izbjeći veća količina difundiranog vodika u metalu zavora, a koji je glavni uzrok nastanka hladnih pukotina. Povećanje tvrdoće u području ZUT-a pri mokrom zavarivanju čelika S500M bilo je sa nominalnih $240 \div 250$ HV10 na približno $260 \div 300$ HV10, što je i dalje niže od 350 HV10, što se prema mnogim autorima smatra kritičnom veličinom za nastanak hladnih pukotina. S druge strane, pri zavarivanju čelika S355J2G3 maksimalne izmjerene tvrdoće u području ZUT-a iznosile su preko 400 HV10. Razlog nastanka tako tvrde i krhke strukture u području ZUT-a prvenstveno je u velikoj brzini hlađenja zavarenog spoja koja je uz ekvivalent ugljika $Ce = 0,44 \%$ za S355J2G3 uzrokovala mjestimično zakaljivanje strukture. Niže vrijednosti tvrdoće ZUT-a kod čelika S500M prvenstveno su rezultat niskog udjela ugljika te malog ekvivalenta ugljika $Ce = 0,30 \%$. Iz rezultata istraživanja može se zaključiti da se niskougljični čelici nakon naknadne termo-mehaničke obrade mogu koristiti za "off-shore" konstrukcije, iako i dalje postoji visoka vjerojatnost nastanka hladnih pukotina pri zavarivanju [31].

Osim prethodno navedenih, do sada su provedena laboratorijska ispitivanja zavarljivosti čelika API 5L X70 mokrim podvodnim zavarivanjem koristeći FCAW-S postupak zavarivanja. Pritom je korištena rutilna praškom punjena samozaštićujuća žica. Na slici 45. može se vidjeti udio difundiranog vodika zavisno o unosu topline korištenom za to ispitivanje [33].



Slika 46. Utjecaj unosa topline na difundirani vodik pri FCAW zavarivanju [33]

Rezultati ispitivanja pokazali su da se podvodnim FCAW postupkom zavarivanja mogu postići znatno niži udjeli difundiranog vodika u metalu zavora u odnosu na REL postupak zavarivanja. Ovo direktno ukazuje na mogućnost postizanja zavarenih spojeva sa manjom osjetljivošću na hladne pukotine. Maksimalna tvrdoća izmjerena je u području udaljenom oko 0,5 mm od linije staljivanja, a iznosila je 409 HV10 za unos topline od 12 kJ/cm, 380 HV10 za unos topline od 15 kJ/cm te 370 HV10 za unos topline od 18 kJ/cm. Dakle, uslijed višeg unosa topline brzina hlađenja zavarenog spoja bila je manja te je postignuta mikrostruktura sadržala veći postotak bainita [33].

3.7.1. Analitički pristup i procjena zavarljivosti čelika API 5L X80

Pojam zavarljivost odnosi se na mogućnost dobivanja homogenih zavarenih spojeva prihvatljivih mehaničkih i ostalih svojstava primjenom uobičajenih ili specijalnih tehnika zavarivanja. Problemu zavarljivosti može se pristupiti s raznih stajališta: metalurškog, konstrukcijskog ili izvedbenog. Metalurška zavarljivost čelika izražava se ekvivalentom ugljika Ce, te je prvi korak pri razmatranju zavarljivosti nekog čelika uvid u njegov kemijski sastav. Kemijski sastav čelika API 5L X80 prikazan je u tablici 3. [44].

Tablica 3. Kemijski sastav šarže čelika kvalitete API 5L X80 korištene za ovaj rad [44]

Kemijski element	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb	S	B	V	Cu
Maseni udio %	0,064	0,33	1,94	0,015	0,17	0,018	0,002	0,014	0,063	0,0006	0,0002	0,001	0,009

Do danas su razvijene mnoge formule za procijenu zavarljivosti čelika iz njegovog kemijskog sastava. Sklonost čelika prema hladnim pukotinama (jedan od pokazatelja zavarljivosti) se često tumači korištenjem eksperimentalno dobivenih formula za ugljikov ekvivalent. Na osnovi djelovanja ugljika i ostalih kemijskih elemenata može se procijeniti mikrostruktura zavarenog spoja.

Prema IIW-u (International Institute for Welding) formula za procjenu zavarljivosti na temelju kemijskog sastava čelika glasi:

$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad (4)$$

Navedena formula koristi se za procjenu zavarljivosti prvenstveno kod feritnih niskolegiranih čelika poput općih konstrukcijskih čelika koji zauzimaju oko 80% svjetske proizvodnje čelika.

U tablici 4. dan je pregled formula koje se koriste za izračunavanje ugljikovog ekvivalenta, kao i korelacija formule sa pojavljivanjem pukotina. Sve navedene formule mogu se koristiti za procijenu zavarljivosti sitnozrnatih čelika povišene čvrstoće.

Tablica 4. Popis formula za izračun ekvivalenta ugljika [34]

METODA	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	B	Korel.
Ceq (WES)	1	$\frac{1}{24}$	$\frac{1}{6}$	-	$\frac{1}{40}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	-	$\frac{1}{4}$	-	72,2
CE (IIW)	1	-	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	-	$\frac{1}{5}$	-	78,1
Graville	1	-	$\frac{1}{16}$	-	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{23}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{9}$	-	82,6
Pn (Tanaka)	1	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{20}$	-	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{20}$	-	-	-	82,8
Duren	1	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{60}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{40}$	-	$\frac{1}{15}$	-	84,0
Pcm (Ito)	1	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{60}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{15}$	-	$\frac{1}{10}$	5	84,9
Stout	1	-	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{40}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	-	-	-	86,6
CEN*	1	$\frac{1}{24}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	5	91,1

*potrebno pomnožiti s koeficijentom A(C)

Ekvivalent ugljika može dovoljno kritički ocijeniti zavarljivost čelika, ali modifikacijom kemijskog sastava čelika (npr. razvojem novog čelika), potrebno je modificirati i formule za izračunavanje ekvivalenta ugljika kao pokazatelja zavarljivosti čelika.

Prema Suzukiju formule Ceq(WES) i CE(IIW) odgovaraju za čelike sa sadržajem ugljika $C \geq 0,18\%$ ili $C \geq 0,20\%$, i vlačnom čvrstoćom od 400 do 700 N/mm² dok za čelika sa sadržajem ugljika $C \leq 0,17\%$ i vlačnom čvrstoćom od 400 do 900 N/mm² predložena formula Ito-a i Bessy-a.

Kombinacijom formula Pcm i CE proizašla je nova formula CEN koja pomnožena s faktorom A(C) prilagođava djelovanje sadržaja ugljika.

$$CEN = C + A(C) \times \left(\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} + 5 \times B \right) \quad (5)$$

gdje se koeficijent $A(C)$ računa po formuli:

$$A(C) = 0,75 + 0,25 \tanh(20 \times (C - 0,12)) \quad (6)$$

Kao i kod ostalih proračuna vezanih za zavarene konstrukcije i ovdje je od posebne važnosti točno prepoznavanje kemijskih elemenata u osnovnom materijalu i zavarenom spoju. Proračuni se izvode za maksimalni sadržaj legirajućih elemenata, pa se tako dobiju maksimalne temperature predgrijavanja čime se smanjuje vjerojatnost hladnih pukotina.

Prema normi API 5L za čelike s manje od 0,12% ugljika ekvivalent ugljika se računa prema Itto-Bessyo formuli:

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (7)$$

pri čemu P_{cm} ne smije biti veći od 0,25 %.

Za šaržu čelika na kojem će biti izvršen eksperiment i ispitivanje P_{cm} slijedi analiza zavarljivosti prema Itto-Bessyo formuli:

$$P_{cm} = 0,064 + \frac{0,33}{30} + \frac{1,94}{20} + \frac{0,009}{20} + \frac{0,018}{60} + \frac{0,17}{20} + \frac{0,002}{15} + \frac{0,001}{10} + 5 \times 0,0002$$

$$P_{cm} = 0,182$$

Prema proračunu ekvivalenta ugljika po Itto-Bessyo formuli za šaržu čelika API 5L X80 P_{cm} iznosi 0,182%. Kako je dobivena vrijednost manja od granične (0,25%) ovaj čelik može se smatrati dobro zavarljivim.

Ako se analizira zavarljivost čelika API 5L X80 prema normi AWS D3.6M:1999 potrebno je odrediti ekvivalent ugljika prema izrazu [35]:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (8)$$

Za šaržu čelika API 5L X80 korištenog u ovom radu slijedi procijena zavarljivosti prema normi AWS D3.6M:

$$CE = 0,064 + \frac{1,94}{6} + \frac{0,17 + 0,002 + 0,001}{5} + \frac{0,018 + 0,009}{15} = 0,423$$

Analitičkom procijenom zavarljivosti čelika API 5L X80 prema normi za podvodno zavarivanje AWS D3.6 dobivena je vrijednost ekvivalenta ugljika $CE=0,423$. Ako se uzme u obzir preporuka iz norme AWS D3.6M:1999 Specification for Underwater Welding koja definira materijala s $CE > 0,4$ kao neprikladne za podvodno zavarivanje, vidljivo je da se za ovu šaržu primjena mokrog podvodnog zavarivanja može smatrati problematičnom i ograničenom. No uslijed sve intenzivnije primjene ove vrste čelika potrebno je raditi na razvoju tehnologije podvodnog zavarivanja koja će moći osigurati adekvatna mehanička svojstva i kompenzirati specifičnosti osnovnog materijala.

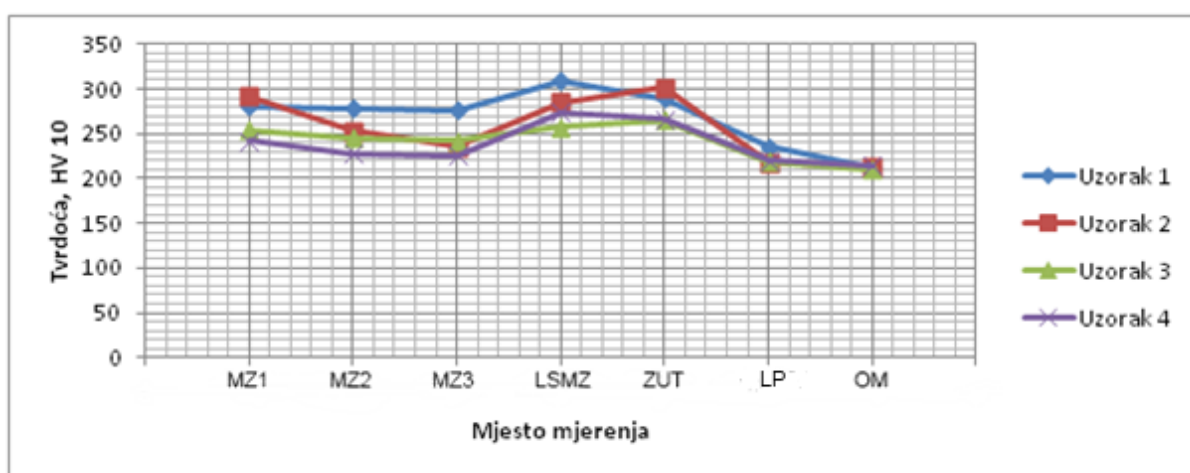
3.8. Prethodna ispitivanja zavarljivosti čelika API 5L X80 mokrim podvodnim zavarivanjem

Na šarži čelika API 5L X80 koja se koristi u ovom radu do sada su već provedena ispitivanja vezana uz zavarljivost pri mokrom podvodnom zavarivanju REL postupkom. Eksperimentalni rad proveden u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje pokazao je da je primjenom tehnologije mokrog podvodnog zavarivanja REL-postupkom moguće na čeliku API 5L X80 dobiti zavareni spoj zadovoljavajućih vrijednosti tvrdoća i geometrije spoja. Mjerenjem tvrdoće HV10 na ispitnim uzorcima ustanovljeno je da su najviše vrijednosti tvrdoće bile u području zone utjecaja topline te na liniji staljivanja metala zavora. Maksimalna tvrdoća navara dobivenih primjenom Thyseen Nahutica Ø3,2 mm elektrode iznosila je 309 HV10 što je za API 5L X80 čiji ekvivalent ugljika iznosi 0,423 znatno niža vrijednost od očekivane. S druge strane, primjenom Lastek Ø4 mm elektrode najviša izmjerena tvrdoća iznosila je 325 HV10. Općenito svi navareni spojevi dobiveni Lastek elektrodom imali su više vrijednosti tvrdoće. Glavni uzrok tome je vjerojatno veći promjer elektrode koji je zahtijevao viši unos topline kako bi se ostvario stabilan proces zavarivanja pod vodom. Kao tehnika rada koristila se tehnika povlačenja, koja se uvijek koristi pri zavarivanju "off-shore" konstrukcija. Zavareni spojevi na čelicima sa ekvivalentom ugljika od 0,36 do 0,4 pri mokrom podvodnom zavarivanju obično imaju tvrdoću između 350 i 410 HV10 što ih čini tvrdim i krhkim. Može se zaključiti da su navareni spojevi dobiveni Lastek i Thyseen Nautica elektrodama na osnovnom materijalu API 5L X80 čeliku po pitanju tvrdoće pokazali dobru primjenjivost za podvodno mokro zavarivanje. Na slikama 47. i 48., te tablicama 5. i 6. mogu se vidjeti rezultati analize tvrdoće uzoraka u tom eksperimentu [37].

Tablica 5. Izmjerene tvrdoće pri zavarivanju X80 čelika Thyseen Nautica elektrodom

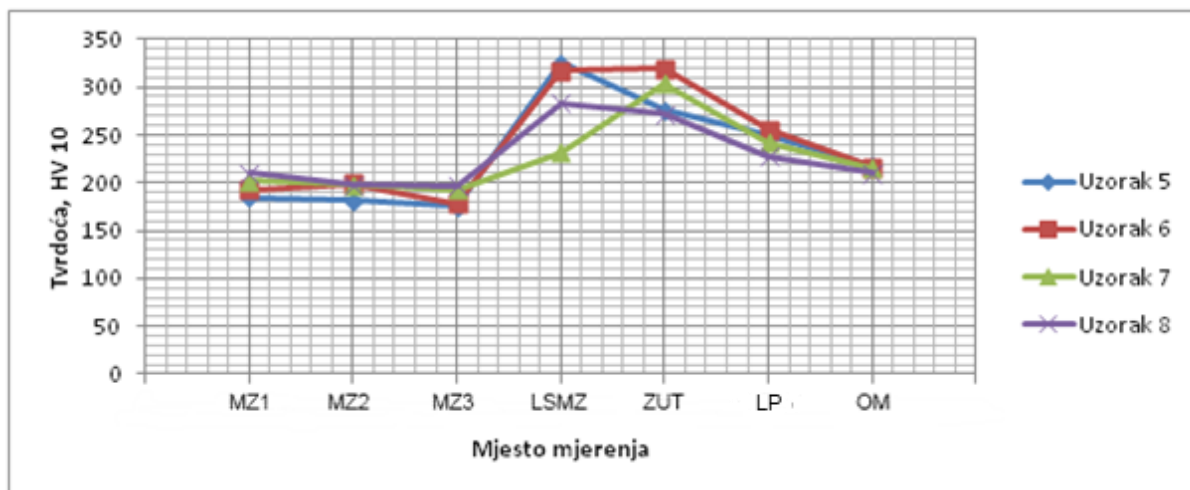
Uzorak	Unos topline (kJ/cm)	Maksimalna tvrdoća	Pozicija
1.	11,89	309	LSMZ
2.	12,83	302	ZUT
3.	15,12	265	ZUT
4.	19,57	274	ZUT

Na slici 47. prikazani su profili izmjerenih vrijednosti tvrdoća.

**Slika 47. Dijagram izmjerenih tvrdoća (API 5L X80 čelik, Thyseen Nautica elektroda)****Tablica 6. Izmjerene tvrdoće pri zavarivanju X80 čelika Lastek elektrodom**

Uzorak	Unos topline (kJ/cm)	Maksimalana tvrdoća	Pozicija
5.	12,82	325	LSMZ
6.	14,01	319	ZUT
7.	19,49	304	ZUT
8.	20,25	283	LSMZ

Na slici 48 prikazani su profili izmjerenih tvrdoća.



Slika 48. Dijagram izmjerenih tvrdoća (API 5L X80 čelik, Lastek elektroda)

3.9. Eksperimentalne metode ispitivanja sklonosti čelika prema nastanku hladnih pukotina kod zavarivanja

Otpornost prema pojavi hladnih pukotina značajan je pokazatelj zavarljivosti čelika. Metode ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama mogu se podijeliti na izravne i neizravne. Izravne metode su one koje se provode eksperimentalnim istaživanjima, dok se neizravne temelje na eksperimentalno dobivenim formulama za procjenu utjecaja raznih čimbenika na pojavu hladnih pukotina. Formule za izračun ekvivalenta ugljika navedene u prethodnim poglavljima primjer su neizravnih metoda [38].

Izravna ispitivanja mogu se podijeliti u tri skupine [38]:

- ispitivanja sa stvarnim zavarivanjem uz vlastitu krutost (Tekken, Lehigh, CTS, probe s kružnim zarezom RD) i probe s prisilnom krutošću (s vanjskim dodatnim opterećenjem, npr. TRC, RRC i dr.);
- ispitivanje s realnim ciklusom ili uloženim uzorkom (čepom ili implantom);
- ispitivanje simuliranjem ciklusa zavarivanjem (npr. ispitivanje na Thermorestor i Smitweld uređajima).

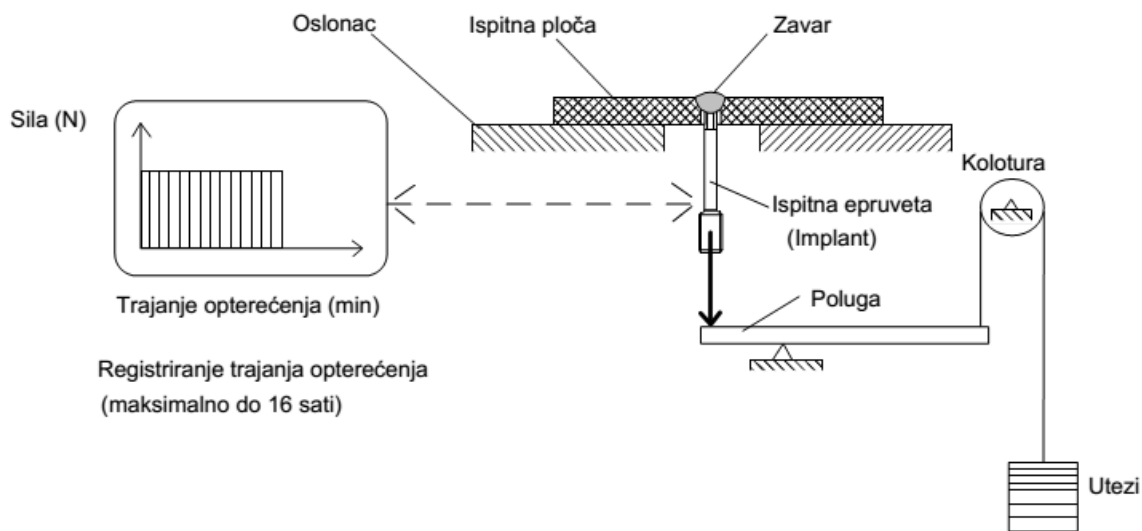
Kriterij ocjene sklonosti hladnim pukotinama može biti:

- kvalitativan, kada se govori je li pukotina prisutna ili ne u zavarenom spoju;
- kvantitativan, ukoliko se može brojčano iskazati neka od relevantnih veličina, kao što su maksimalna naprezanja pri kojima se iniciraju pukotine, relativna dubina pukotina, dužina pukotine, postotak pukotina i dr. Općenito se u svijetu najviše koriste metode za ispitivanje sklonosti čelika na pojavu hladnih pukotina, metoda Implant, Tekken i CTS, dok japanski istraživači daju prednost metodama: IRC, TRC, RRC i dr., kod kojih se može mijenjati intenzitet ukrućenja u tijeku zavarivanja [38].

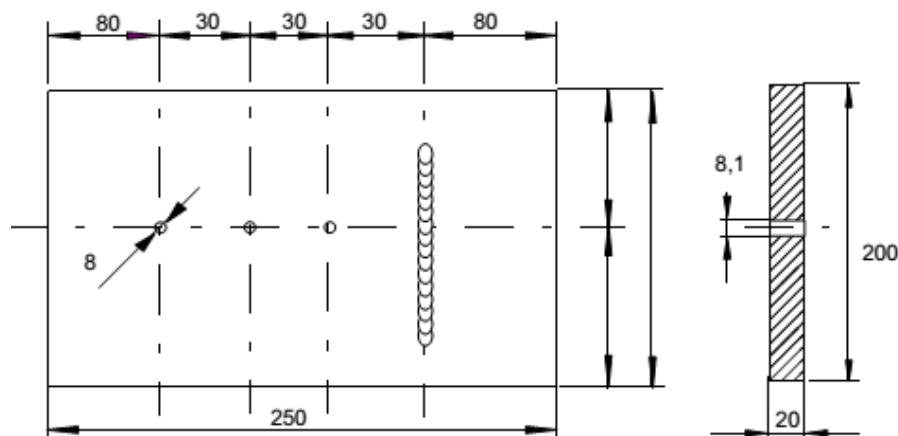
Implant metoda pokazala se najboljom kada se govori o ispitivanju u uvjetima podvodnog zavarivanja jer je moguća odvojena procjena različitih metalurških i operativnih uvjeta koji uzrokuju pojavu hladnih pukotina. To se prvenstveno odnosi na različite nivoe naprezanja, brzine hlađenja i količine vodika. Uz to, moguće je dobiti kvantitativne rezultate kritičnog naprezanja za dane uvjete koji se mogu primjeniti u izradi matematičkih modela. Implant test je zbog svoje fleksibilnosti moguće primjeniti i pri komparaciji jednoprolaznog i višeprolaznog zavarivanja [39]. Postoje i primjeri primjene Tekken metode, međutim zbog izražene varijabilnosti utjecajnih parametara Implant test se puno češće primjenjuje.

3.9.1. Implant metoda

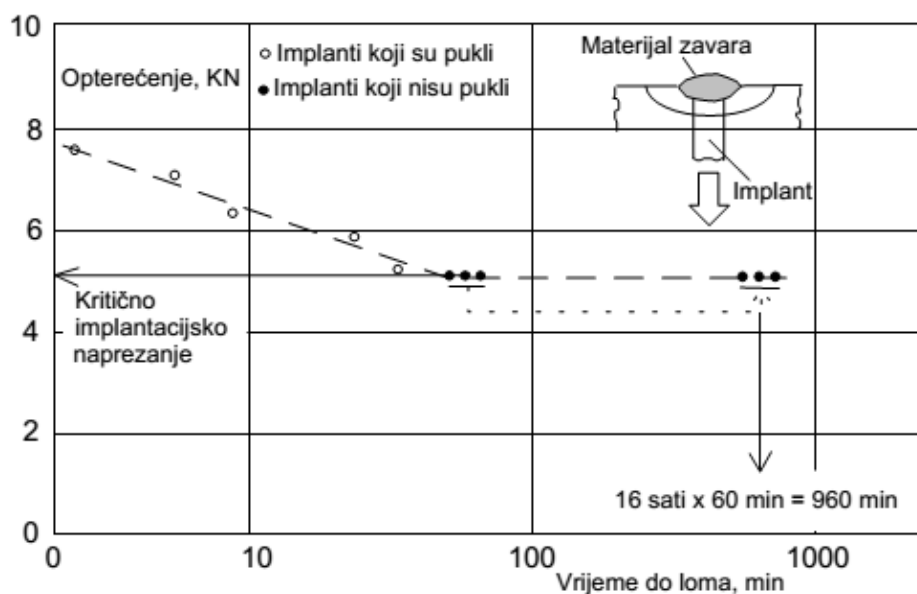
Metoda implant omogućuje kvantitativno ispitivanje osjetljivosti zavarenih spojeva na nastanak hladnih pukotina. Ispitivanje ovom metodom zasniva se na promjeni utjecajnih čimbenika, kao što su: osnovni i dodatni materijal, zavarivački toplinski ciklus, temperatura predgrijavanja, sadržaj difuzijskog vodika, naprezanje kao i sagledavanje njihovih međusobnih utjecaja na nastanak hladnih pukotina. Za kvantificiranje sklonosti čelika na pojavu hladnih pukotina metodom implant potrebno je odrediti kritično implantacijsko naprezanje R_{IK} . To je maksimalno naprezanje kod kojeg ne nastaje lom epruete. Kritično implantacijsko naprezanje R_{IK} uspoređujemo s granicom plastičnosti osnovnog materijala $R_{p0,2}$. Smatra se da na realnoj konstrukciji neće doći do pojave hladnih pukotina, ako je $R_{IK} \geq R_{p0,2}$ osnovnog (ispitnog) materijala. Pod pojmom implant podrazumijeva se strojno obrađeni cilindrični umetak izrađen iz čelika koji treba ispitati, točno definiranog promjera. Epruete mogu imati kružni ili spiralni zarez koji ima ulogu koncentratora naprezanja za iniciranje pukotine zbog vodika. Implant (umetak) se postavlja u otvor podložne ploče iz istog ili sličnog materijala kao što je ispitni, pri čemu je čelona površina implanta površina podložne ploče u istoj razini. Na idućim slikama prikazane su bitne varijable za provođenje implant metode.



Slika 49. Shematski prikaz uređaja za ispitivanje implant metodom [40]



Slika 50. Izgled ispitne ploče po Implant metodi [40]

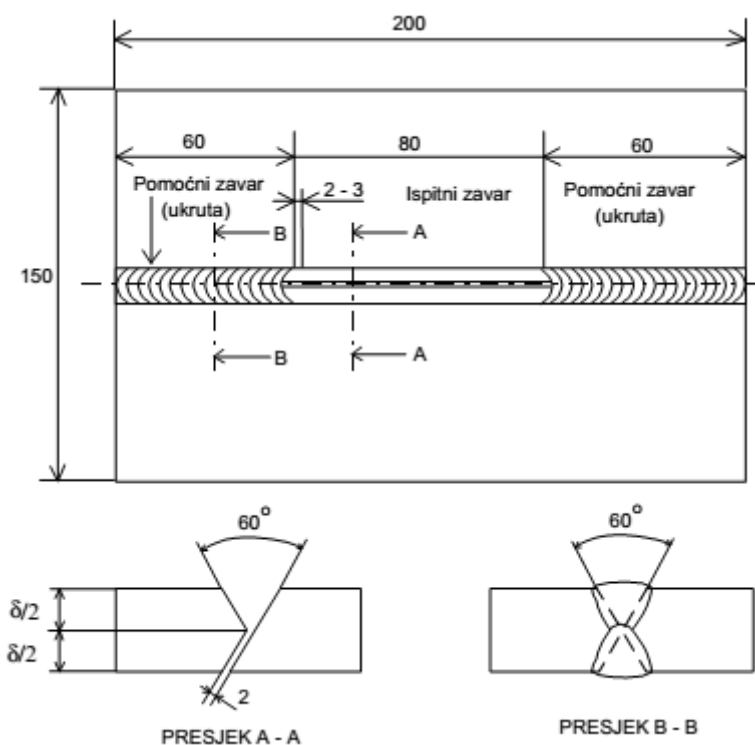


Slika 51. Dijagram opterećenja implant - eprueta tijekom vremena do loma [40]

Kada se opterećenje podijeli sa površinom poprečnog presjeka implanta - epruete, dobiju se vrijednosti implantacijskog naprezanja. Ono naprezanje kod kojega dolazi do loma implanta - epruete naziva se kritično implantacijsko naprezanje. Poželjno je da je ono što više, jer je tada bolja zavarljivost materijala. Kako se povećava sadržaj difuzijskog vodika, razina zaostalih napetosti i zakaljivost materijala, do loma epruete dolazi ranije i kod nižih naprezanja. U tim je slučajevima kritično implantacijsko naprezanje niže, što je nepovoljno jer znači slabiju zavarljivost [40].

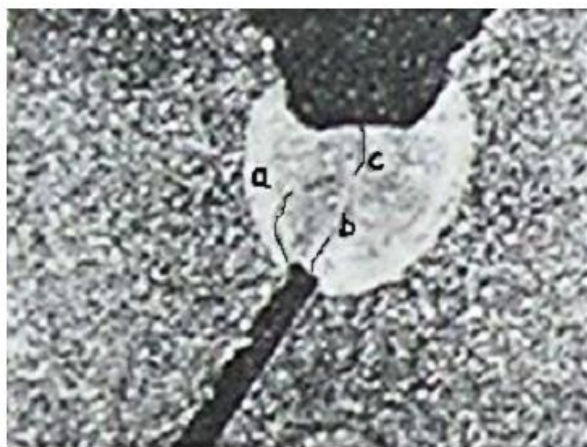
3.9.2. Tekken metoda

Radi se o jednostavnom ispitivanju koje se temelji na dilataciji zavarenih limova. Ovo ispitivanje našlo je široku primjenu u svom osnovnom modificiranom obliku. Može se koristiti kao tehnološko ispitivanje pri postupku elektrolučnog zavarivanja pod praškom, za relativno tanke limove (12 mm), kao i za one čija je debljina do 150 mm. Ispitivanje se najčešće koristi pri izboru parametara zavarivanja korijenskog prolaza sučeljenih spojeva. Za razliku od Implant metode, Tekken daje kvalitativne rezultate ispitivanja, tj. pokazuje ima li pukotina uz određenu tehnologiju i uvjete zavarivanja ili ne [41]. Na slici 53. može se vidjeti priprema spojeva za Tekken metodu.



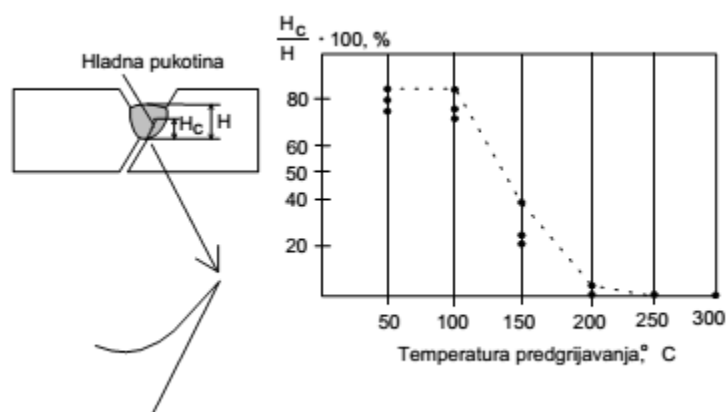
Slika 52. Priprema spojeva za Tekken metodu [40]

Pukotine se najčešće u području linije staljivanja metala zavara, što ukazuje na to da je pogodno za razlikovanje raznih osnovnih materijala. Uzorak se najčešće priprema od dvije međusobno zavarene ploče, pri čemu zazor Y spoja treba biti 2 mm. Za tehnologiju zavarivanja pod zaštitom praška pomoćni šav se završava do kraja na jednoj strani. Pri ovom ispitivanju javljaju se 3 tipa pukotina. To su pukotine koje nastaju na prijelaznoj zoni donjeg dijela korijenskog spoja *a*, na strani X pripreme ispitnog spoja. To su tipične hladne pukotine (uzrokovane vodikom), koje se šire do ZUT-a i mogu se vratiti natrag do metala zavara. [41]



Slika 53. Tipična mjesta nastanka hladnih pukotina [41]

Pukotina tipa *b* i *c* nastaju u metalu zavora pri čemu se mogu spajati. Ispitivanje se ocjenjuje analizom 5 isječaka, od kojih su dva iz početnog i završnog kratera. Iz ovih analiza se određuje učestalost pojave pukotina po dužini uzorka u ovisnosti od parametara zavarivanja (npr. temperatura predgrijavanja). Na slici 55. dat je prikaz ovakvog ocjenjivanja.



Slika 54. Prikaz ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama po Tekken metodi [41]

Da bi se prihvatio parametar zavarivanja poput temperature predgrijavanja potrebno je uspješno zavariti bez nastanka pukotina 3 uzorka. Utjecajni parametri za izbjegavanje pukotina su: sadržaj vodika u metalu zavora, temperatura predgrijavanja te unos topline. Kad se pukotina pojavi, klasifikacija zavarenog spoja se izvodi uvođenjem "koeficijenta pukotine". Koeficijent pukotine jednostavno se izračunava omjerom visine pukotine i visine zavarenog spoja.

Procedura izvođenja Tekken testa:

- prvo se zavare pomoćni zavari, a tek onda ispitni zavar, pomoćnim zavarima ploča je ukrućena (nema stezanja i rastezanja);
- eprueta se ostavi 48 sati da stoji i zatim se ispituje;
- ispitivanja se vrše prvo vizualnim pregledom, zatim pomoću penetranata, te na kraju se zavar izrezuje na 3 mjesta, rade se makroizbrusci te provodi makroanaliza;
- u ovisnosti o duljini i visini pukotina zaključuje se o sklonosti prema hladnim pukotinama.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

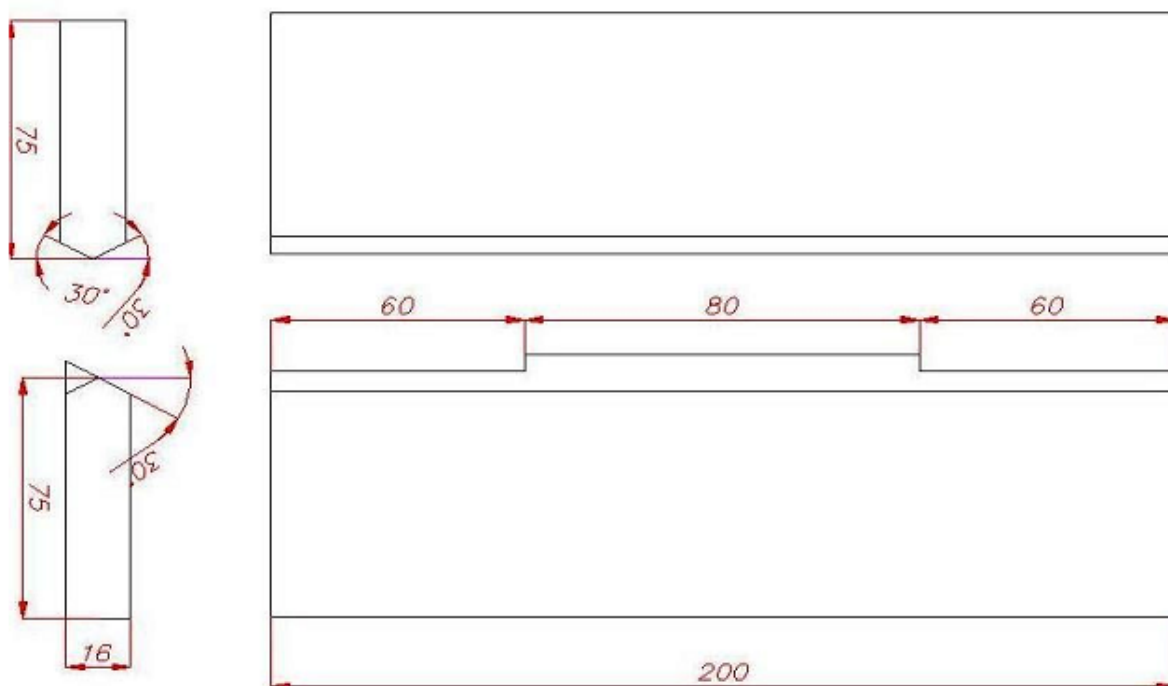
Cilj eksperimentalnog dijela ovoga rada bio je odrediti zavarljivost čelika visoke čvrstoće kvalitete API 5L X80 prilagodbom postojećih konvencionalnih metoda za ispitivanje osjetljivosti na pojavu hladnih pukotina. U ovom eksperimentu korištena je Tekken metoda. Iako je analiza zavarljivosti čelika pri podvodnom zavarivanju prema normi za podvodno zavarivanje AWS D3.6M:1999 pokazala da ovaj čelik nije moguće uspješno zavariti u podvodnim uvjetima, to ne mora biti konačan zaključak. Naime, uslijed sve veće potražnje čelika API 5L X80 kao materijala za izradu cjevovoda za transport energenata pod vodom, potrebno je razviti nove pristupe i mjerila za procjenu zavarljivosti pri mokrom podvodnom zavarivanju.

Eksperimentalni dio ovog diplomskog rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Pri planiranju pokusa, na temelju definiranog sustava organizacije istraživanja, oblikovan je koncept u kojem je zatvoren ciklus od izrade uzoraka strojnom obradom, podvodnog zavarivanja pa do ispitivanja zavarenih uzoraka Tekken metodom.

4.1. Priprema uzoraka

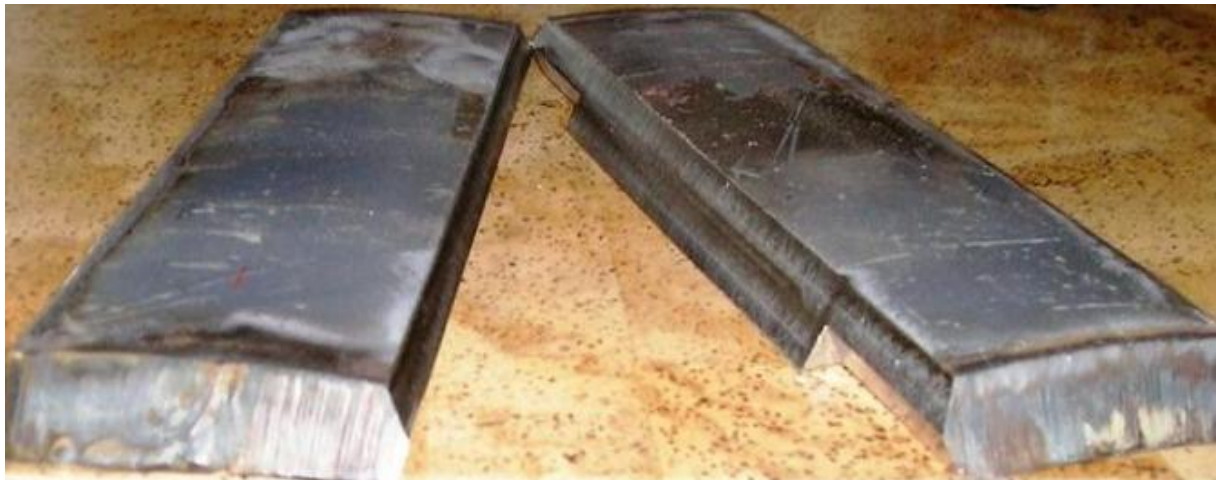
Uzorci za eksperimentalno određivanje zavarljivosti prema mjerilu osjetljivosti na nastanak hladnih pukotina izrađeni su iz ploča čelika API 5L X80 debljine 10 mm. Kemijski sastav čelika API 5L X80 kao i procjena zavarljivosti prema uputama iz standarda API 5L i AWS D3.6-1999 prikazani su u pogavlju 3.7.1.

Prva faza izrade uzoraka bila je izrezivanje uzoraka iz ploča plinskim plamenom na osnovne dimenzije definirane za Tekken metodu 200 x 75 x 10 mm. Završno oblikovanje žlijeba prema pripremi spoja za Tekken metodu prikazanoj na slici 54. provedeno je strojnom obradom u Laboratoriju za obradu odvajanjem čestica.



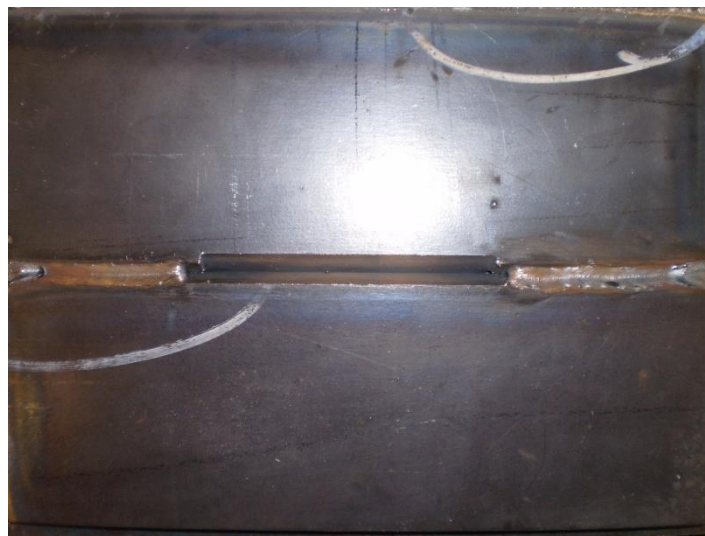
Slika 55. Nacrt za obradu ploča glodanjem

Na slici 56. mogu se vidjeti ploče nakon strojne obrade.



Slika 56. Ploče za ispitivanje zavaljivosti Tekken metodom nakon strojne obrade

Prije podvodnog zavarivanja bilo je potrebno zavariti pomoćne (sidrene) zavare koji sprječavaju pojavu stezanja i rastezanja uzoraka tijekom podvodnog zavarivanja. Pomoćni zavari izrađeni su u suhim uvjetima MAG postupkom zavarivanja. Za izradu pomoćnih zavara korištena je plinska mješavina od 82% Ar i 18% CO₂ te izvor struje za zavarivanje VARSTROJ VPS 4000. Na slici 57. prikazana je ploča sa zavarenim pomoćnim zavarima.



Slika 57. Završna priprema ploča za Tekken ispitivanje

4.2. Podvodno mokro REL zavarivanje

Podvodno mokro REL zavarivanje provedeno je u bazenu dimenzija 1100 x 600 x 750 mm, zapremnine 500 litara. Zavarivanje uzoraka provedeno je na dubini od 250 mm, u slatkoj vodi iz gradske opskrbe, temperature 20 do 25 °C, uz temperaturu zraka od 22 do 30 °C. Na slici 58. prikazan je bazen korišten za podvodno zavarivanje.



Slika 58. Bazen za podvodno zavarivanje

Za ovaj eksperiment izrađeno je ukupno 8 uzoraka. Od 8 uzoraka 2 su bila namijenjena za probno zavarivanje. Naime, pošto se radilo o podvodnom zavarivanju sučeljenog spoja s dodatnim materijalima, Lastek elektrodama Ø3,2 te Ø4 mm, prije svakog ispitnog zavarivanja bilo je potrebno na probnim uzorcima pronaći odgovarajuće parametre zavarivanja i tehniku rada za svaku od elektroda. Lastek 1008 je elektroda namijenjena za podvodno mokro zavarivanje čelika povišene i visoke čvrstoće. Elektroda sadrži rutilnu prevlaku s dodacima željeznog praha i nikla. Obloga elektrode premazana je prozirnim polimerskim slojem koji održava stabilnost obloge i sprječava prodor vode, te je ujedno i izolator čime se povećava sigurnost ronilaca i stabilnost električnog luka. Preporuča se primjena istosmjerne struje DC na minus (-) polu. U tablicama 7. i 8. prikazan je kemijski sastav i mehanička svojstva metala zvara elektrode Lastek 1008.

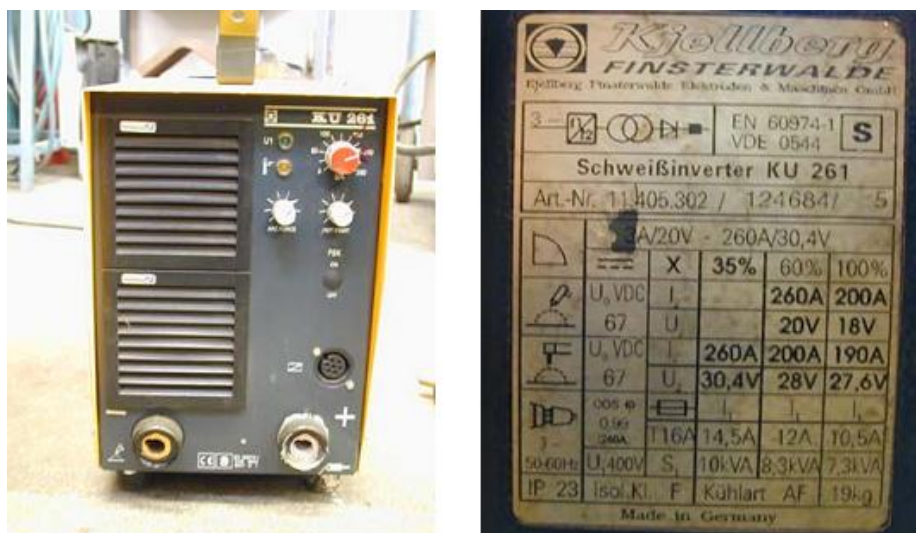
Tablica 7. Kemijski sastav metala zavara elektrode Lastek 1008 (suho zavarivanje) [42]

Kemijski element	C	Mn	Si	S	P	Ni
Maseni udio, %	0,05	0,5	0,45	0,025	0,025	0,30

Tablica 8. Mehanička svojstva metala zavara elektrode Lastek 1008 [42]

Uvjeti zavarivanja	Vlačna čvrstoća R_m [N/mm^2]	Istezljivost A [%]	Kontrakcija Z [%]	Udarna radnja loma K_v
Suho zavarivanje	540	26	70	62 J pri 0°C
Mokro zavarivanje	564	12 do 13,5	47	50 do 54 J pri -20°C

Elektroda Lastek 1008 zadovoljava sve zahtjeve na mehanička svojstva za klasu zavara B prema normi AWS D3.6M:1999. Izvor struje korišten za zavarivanje uzoraka zajedno sa svojim karakteristikama prikazan je na slici 59.



Slika 59. Izvor struje za zavarivanje te njegove karakteristike

Od preostalih 6 uzoraka, 2 uzorka zavarena su na suhom, jedan u jednom, a jedan u više prolaza, oba pomoću standardne rutilne elektrode EZ 11-F promjera 3,2 mm kako bi bila

moгуća usporedba mehaničkih svojstva zavara dobivenih u suhim i mokrim uvjetima zavarivanja. Od uzoraka za podvodno zavarivanje 2 su zavarena u jednom prolazu, a dva u više prolaza kako bi se mogao procijeniti utjecaj višeslojnog zavarivanja na mehanička svojstva zavara. Na tablicama 9. i 10. prikazan je kemijski sastav i mehanička svojstva čistog metala zavara za elektrodu EZ 11-F.

Tablica 9. Kemijski sastav metala zavara elektrode EZ 11-F [43]

Kemijski element	C	Mn	Si
Maseni udio, %	0,08	0,6	0,35

Tablica 10. Mehanička svojstva metala zavara elektrode Lastek 1008 [43]

Vlačna čvrstoća $R_m [N/mm^2]$	Granica razvlačenja $R_e [N/mm^2]$	Istezljivost A [%]	Udarna radnja loma K_v
500 - 640	> 420	> 20	≥ 60 J pri 0°C

Na idućim slikama može se vidjeti čitav postupak izvođenja podvodnog mokrog REL zavarivanja.



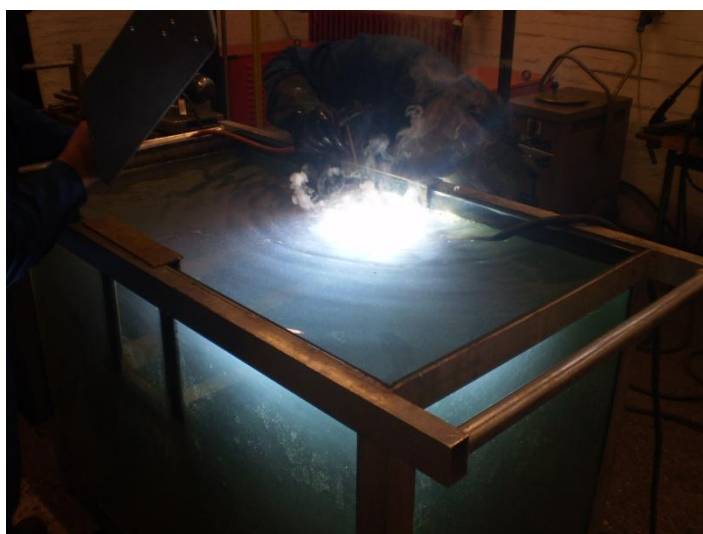
Slika 60. Zavarivanje pomoćnih zavara MAG postupkom



Slika 61. Uzorak pripremljen za zavarivanje ispitnog zavora



Slika 62. Pozicioniranje pištolja za početak zavarivanja ispitnog Y-spoja



Slika 63. Mokro podvodno REL zavarivanje

Na tablici 11. prikazani su parametri zavarivanja uzoraka u suhim i mokrom uvjetima.

Tablica 11. Parametri zavarivanja uzoraka za Tekken ispitivanje

Uzorak	Broj prolaza	Vrsta struje i polaritet	Struja [A]	Napon [V]	Promjer elektrode [mm]	Brzina zavarivanja [cm/min]	Nagib elektrode [°]	Unos topline [kJ/cm]
MOKRO (elektroda Lastek 1008)								
1	1	DC, -	190	13,7	3,2	13,4	70 do 80	9,32
2	1	DC, -	192	13,8	3,2	13,3	70 do 80	9,56
	2	DC, -	195	13,5	3,2	13,4	70 do 80	9,43
	3	DC, -	195	13,6	3,2	13,6	70 do 80	9,36
3	1	DC, -	240	14,6	4	12,8	70 do 80	13,14
4	1	DC, -	238	14,6	4	13,1	70 do 80	12,73
	2	DC, -	240	14,5	4	12,9	70 do 80	12,95
	3	DC, -	242	14,7	4	13,2	70 do 80	12,94
SUHO (elektroda EZ 11-F)								
5	1	DC, -	120	17,5	3,2	13,1	70 do 80	7,7
6	1	DC, -	120	17,4	3,2	13,2	70 do 80	7,59
	2	DC, -	125	17,6	3,2	12,9	70 do 80	8,19

Specifična unesena toplina po dužinskoj mjeri je zbog disipacije u vodi smanjena, a koeficijent iskoristivosti električnog luka pri REL zavarivanju $\eta_{REL} = 0,8$. Napon i struja mjereni su strujnim klještima te voltmetrom, a brzina zavarivanja je određena pomoću štoperice. Unos topline računat je prema izrazu iz standarda HRN EN 1011-1:

$$q = \frac{U \cdot I \cdot \eta_{REL} \cdot 60}{v_{zav} \cdot 1000}, \left[\frac{kJ}{cm} \right] \quad (8)$$

pri čemu su:

q - unos topline, kJ/cm

v_{zav} - brzina zavarivanja, cm/min

U - napon zavarivanja, V

I - struja zavarivanja, A

η_{REL} - stupanj iskorištenja postupka zavarivanja, za zavarivanje REL postupkom iznosi 0,8

4.3. Ispitivanje uzoraka –vizualna kontrola

Nakon zavarivanja uzorci su ostavljeni 48 sati na čekanju, pošto unutar tog vremena može doći do pojave hladnih pukotina u zavarenom spoju. Prvo je uslijedila vizualna kontrola. Vizualnom kontrolom nije uočena niti jedna longitudinalna ili transverzalna pukotina u područjima metala zavara ili ZUT-a. Unatoč tome, uočena je nepravilna geometrija zavara na svim uzorcima zavarenim pod vodom. Ova nepravilnost posebice je eskalirala na uzorcima 2 i 4 koji su zavareni u više prolaza. Glavni razlog nepravilnoj geometriji zavara jest otežana kontrola nad električnim lukom zavarivača uslijed ograničene vidljivosti u bazenu. Osim nepravilnih gusjenica uočena je i gruba površina lica zavara. Naime, uslijed velike brzine hlađenja talina nije imala dovoljno vremena da pravilno popuni žlijeb te oblikuje lice zavara. Ova pojava potvrđuje razlog zašto se pri podvodnom zavarivanju uvijek zavaruju kutni spojevi, a ne sučeoni. Kod uzoraka zavarenih u suhim uvjetima nisu uočene nikakve nepravilnosti. Na idućim slikama mogu se vidjeti svi uzorci, 48 sati nakon podvodnog zavarivanja.



Slika 64. Uzorak 1 (Lastek elektroda Ø3,2, 1 prolaz) - vizualna kontrola



Slika 65. Uzorak 2 (Lastek elektroda Ø3,2, 3 prolaza) - vizualna kontrola



Slika 66. Uzorak 3 (Lastek elektroda Ø4, 1 prolaz) - vizualna kontrola



Slika 67. Uzorak 4 (Lastek elektroda Ø4, 3 prolaza) - vizualna kontrola



Slika 68. Uzorak 5 (Elektroda EZ 11-F Ø3,2, 1 prolaz) - vizualna kontrola

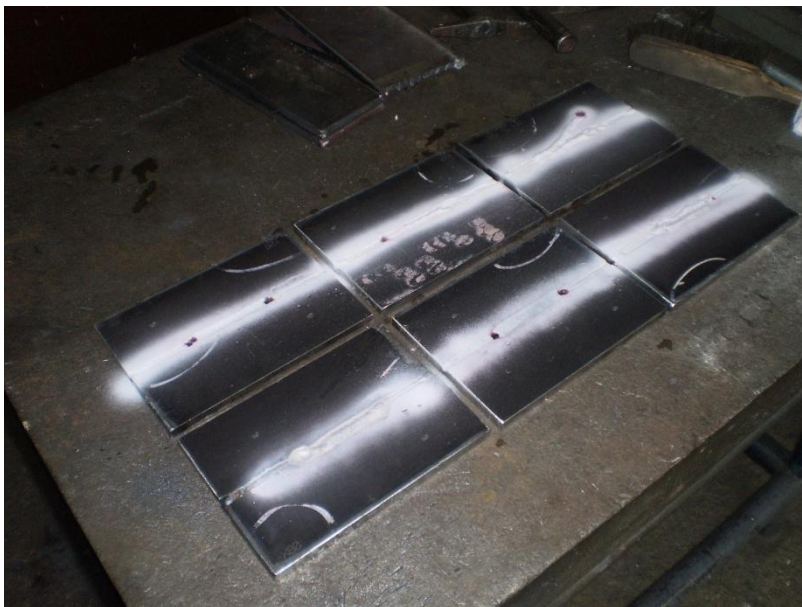


Slika 69. Uzorak 6 (Elektroda EZ 11-F Ø3,2, 3 prolaza) - vizualna kontrola

4.4. Ispitivanje uzoraka – kontrola penetrantima

Nakon vizualne kontrole slijedila je kontrola ispitivanja penetrantima. Ova metoda se koristi za uočavanje bilo kakvih površinskih nepravilnosti, poput pora ili pukotina. Prvi korak ispitivanja sastojao se u nanošenju sredstva za odmaščivanje ispitne površine, te puštanju sredstva da se upije u površinu zavara tijekom perioda od 5 minuta. Kao sredstvo za odmaščivanje korištena je tekućina u spreju Tiede-PEN RL-40. Nakon 5 minuta na ispitnu površinu nanesen je penetrant crvene boje ColorPEN Tiede-PEN PWL-1 koji je ostavljen na ispitnoj površini u periodu od 10 minuta. Poslije 10 minuta ispitna površina bila je detaljno očišćena od penetranta te se na nju zatim nanio razvijatelj Tiede-PEN DL-20 koji je ostavljen na površini u periodu od 10 minuta. Tijekom kontrole uzoraka penetrantskom metodom nisu uočene nikakve indikacije hladnih pukotina duž lica zavarenih spojeva. Na svim uzorcima uočene su indikacije kraterskih pukotina na početku i kraju procesa zavarivanja, koje su najvjerojatnije nastale uslijed nestabilnosti procesa pri uspostavljanju te prekidanju

električnog luka. Osim toga, krateri se javljaju na mjestima dodira sidrenih i ispitnih zavara, te nisu relevantni za ocjenu zavarljivosti u ovom slučaju. Na slici 70. mogu se vidjeti uzorci nakon provedenog ispitivanja penetrantima.



Slika 70. Uzorci nakon provedenog ispitivanja penetrantima

4.5. Makroanaliza

Nakon penetrantske kontrole iz svake od ploča izrezane su trake plinskim postupkom rezanja, prikazanom na slici 71.



Slika 71. Rezanje uzoraka na trake plinskim plamenom

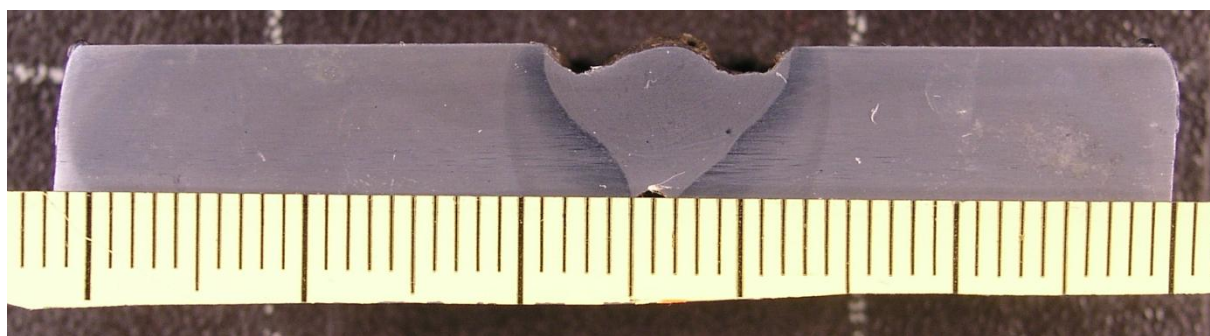
Zatim su iz svake od traka tračnom pilom izrezana po dva makroizbruska približnih dimenzija 50 x 30 x 10 mm. Tako je dobiveno 12 makroizbrusaka. Svaki od makroizbrusaka numeriran je, brušen do gradacije brusnog papira P500. Brušenje je izvođeno naizmjeničnim okretanjem

uzorka svaki put kad se prelazi na višu granulaciju brusnog papira zbog izbjegavanja nastajanja risova i mikro brazda. Na kraju su svi uzorci polirani. Nakon poliranja uzorci su nagriženi sa 3% HNO_3 otopinom dušične kiseline 15-tak sekundi kako bi zone osnovnog metala, zone utjecaja topline, linije staljivanja metala zavara te metala zavara postale vidljive. Postupak nagrivanja može se vidjeti na slici 72.

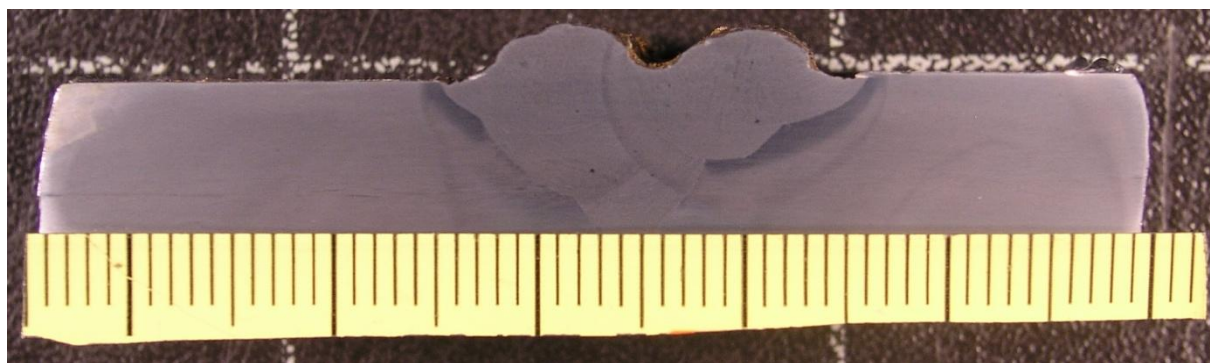


Slika 72. Nagrivanje uzoraka

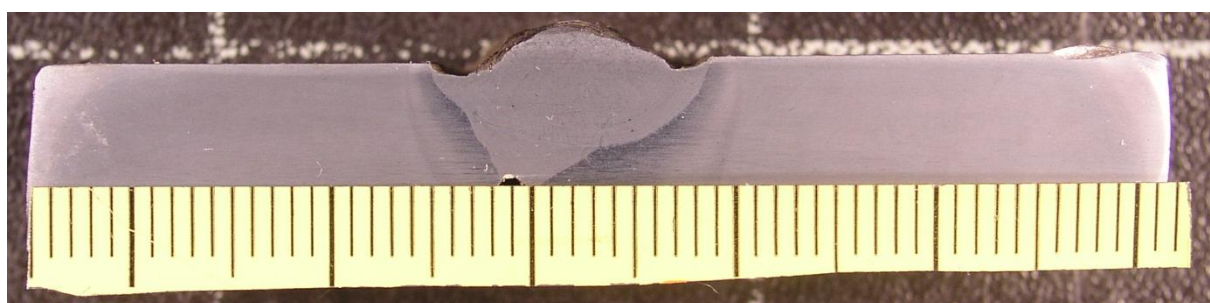
Nakon nagrivanja svaki od uzoraka neutraliziran je u alkoholu, posušen te na kraju fotografiran. Na idućim slikama mogu se vidjeti makroizbrusci sa mjernom skalom.



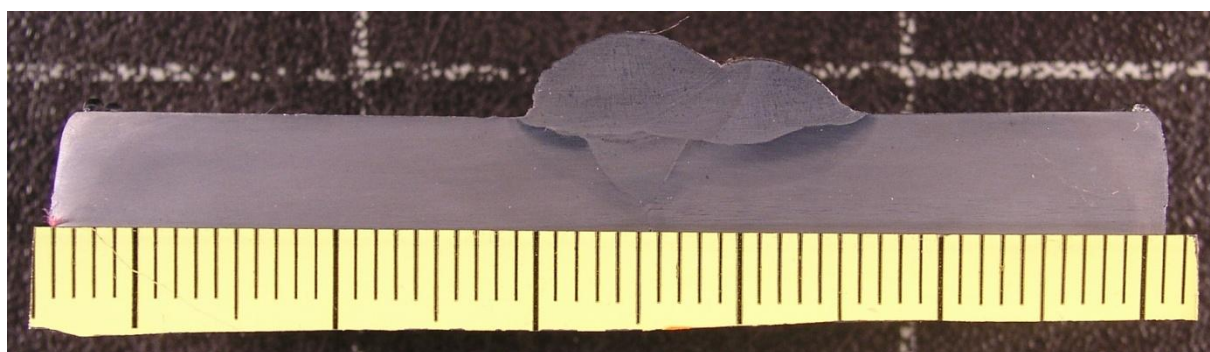
Slika 73. Makroizbrusak uzorka 1



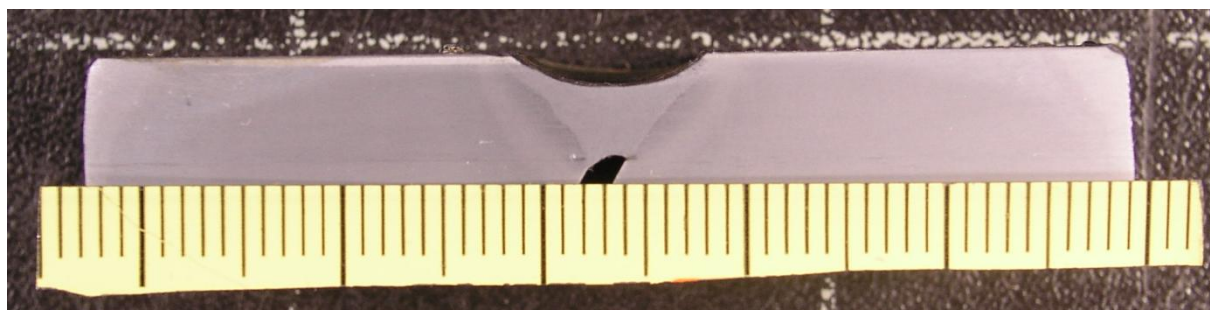
Slika 74. Makroizbrusak uzorka 2



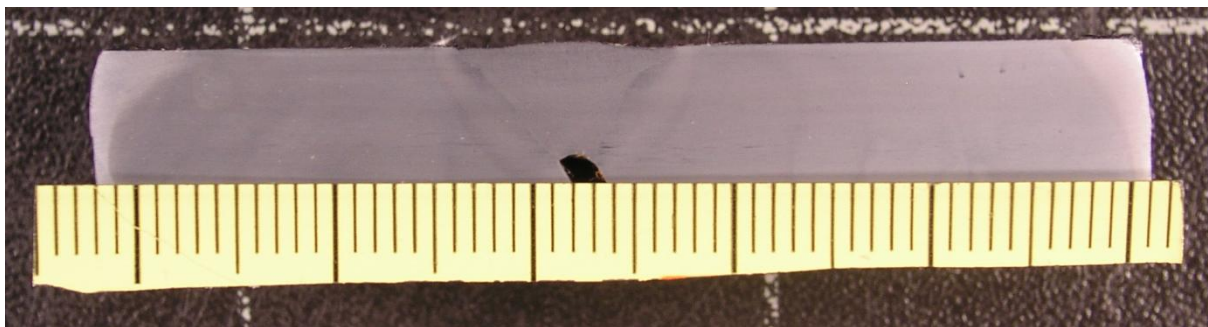
Slika 75. Makroizbrusak uzorka 3



Slika 76. Makroizbrusak uzorka 4



Slika 77. Makroizbrusak uzoraka 5

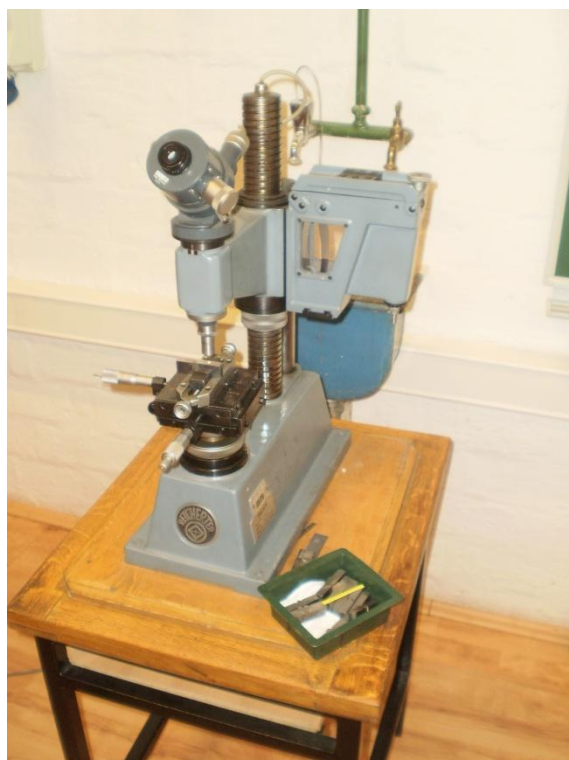


Slika 78. Makroizbrusak uzorka 6

Na gornjim slikama može se vidjeti kako ni na jednom od uzoraka nije došlo do pojave pukotina, što govori da je koristeći dodatni materijal Lastek 1008 uz pravilan unos topline moguće dobiti zavarene spojeve bez pojave hladnih pukotina mokrim podvodnim REL zavarivanjem.

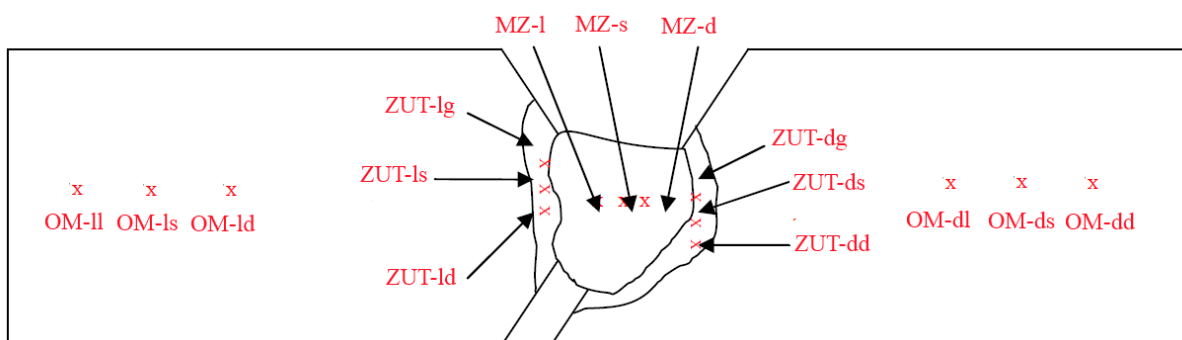
4.6. Mjerenje tvrdoće

Završno ispitivanje uzoraka sastojalo se u mjerenju tvrdoće te analize dobivenih rezultata. Tvrdoća kao svojstvo materijala predstavlja otpornost materijala prema prodiranju drugog, znatno tvrdog dijela. Za samo ispitivanje nije potrebna izrada posebnih eprueta kao na primjer kod ispitivanja žilavosti Charpy-evim batom ili ispitivanja čvrstoće materijala, već je samo potrebno odgovarajuće pripremiti plohe uzoraka. Uređaji za mjerenje tvrdoće nazivaju se tvrdomjeri, te su u pravilu jednostavniji i jeftiniji od nekih drugih uređaja za ispitivanje mehaničkih svojstava, kao npr. kidalice. U okviru ovog rada provedeno je ispitivanje tvrdoće HV10 na pojedinim makroizbruscima. Tvrdoća je izmjerena na uređaju Reicherter TM12 prikazanom na slici 79.



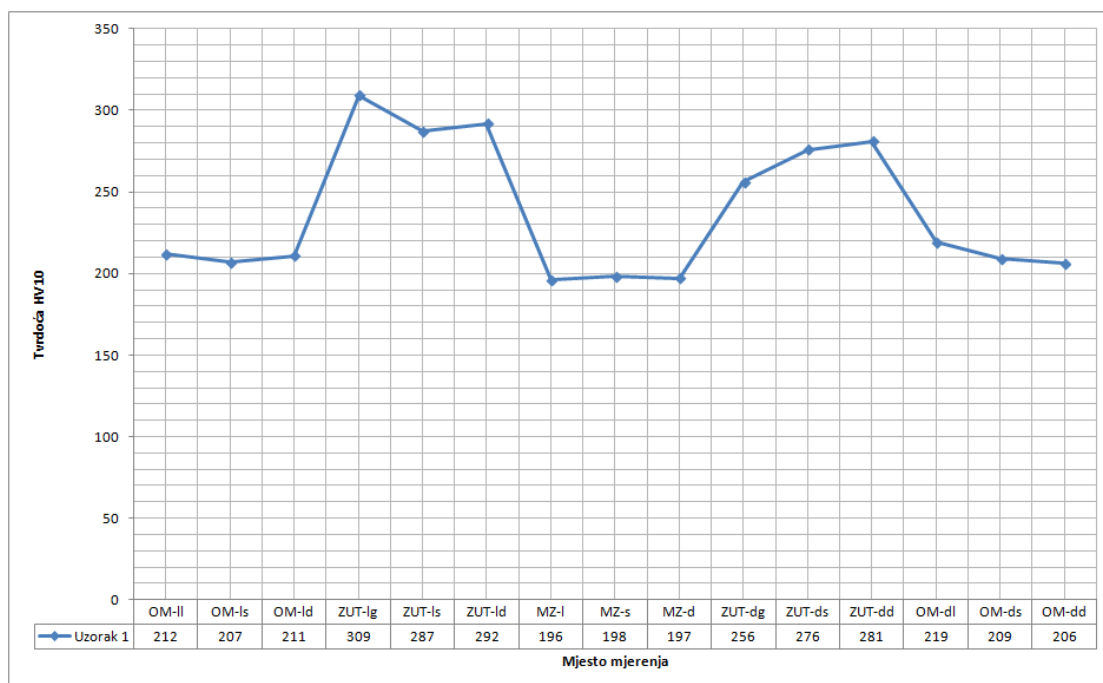
Slika 79. Tvrdomjer Reicheter TM12

Mjerenje tvrdoće često služi kao kontrolni faktor za procjenu zavarljivosti. Prema normi AWS D3.6M:1999 maksimalna tvrdoća za zavare klase B u slučaju zavarivanja osnovnog materijala minimalne čvrstoće od 550 N/mm^2 iznosi 375 HV10, a u praksi se često pojavljuju i znatno više vrijednosti. Od svakog od uzoraka izabran je jedan makroizbrusak na kojem je provedeno mjerenje tvrdoće. Tvrdoća se mjerila u 15 točaka po uzorku. Posebno se obratila pozornost na liniju staljivanja i mjerenje tvrdoće od linije prema vidljivom ZUT-u. Na slici 80 prikazan je plan mjerenja tvrdoće.



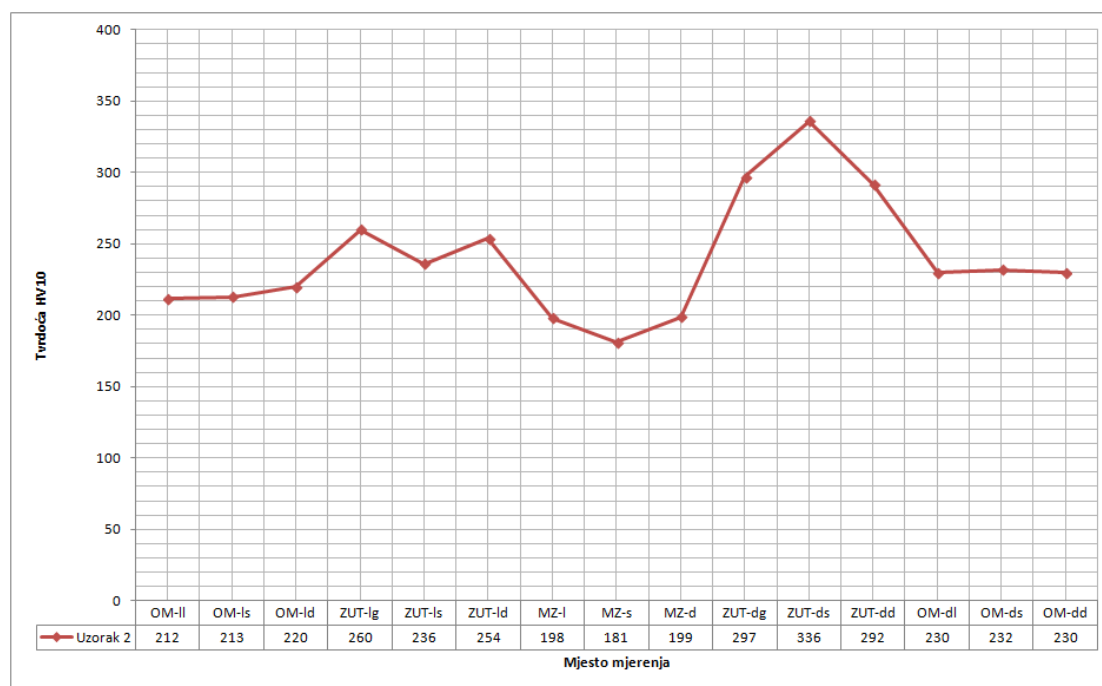
Slika 80. Plan mjerenja tvrdoće

Prema analitičkoj metodi procjene zavarljivosti definiranoj u normi AWS D3.6M:1999 za ovu šaržu čelika procijenjen je ekvivalent ugljika 0,423, pa se mogu očekivati povišene vrijednosti tvrdoće.



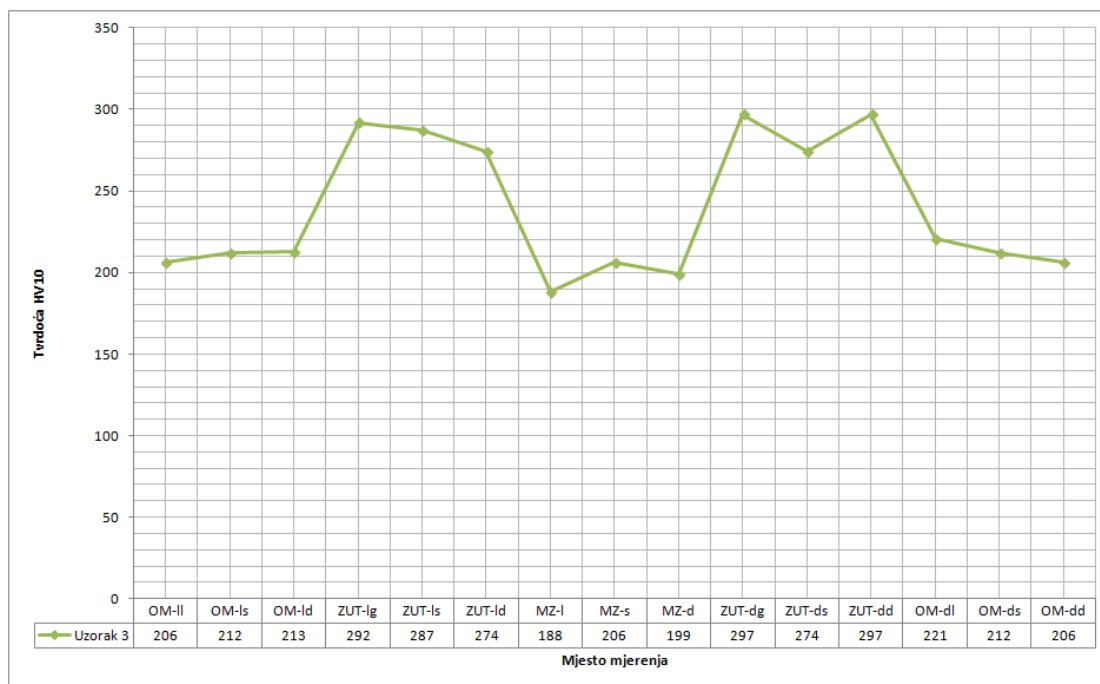
Slika 81. Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 1

Uzorak 1 zavaren Lastek 1008 Ø3,2 elektrodom u jednom prolazu uz približan unos topline od 9,32 kJ/cm. Najviše tvrdoće izmjerene su u području ZUT-a, s maksimalnom vrijednošću od 309 HV10. Budući da prema normi AWS D3.6M kao maksimalna tvrdoća za zavare klase B i minimalnu vlačnu čvrstoću osnovnog materijala od 550 N/mm² iznosi 375 HV10, ova proba sa najvišim vrijednostima zadovoljava s obzirom na dobivene rezultate.



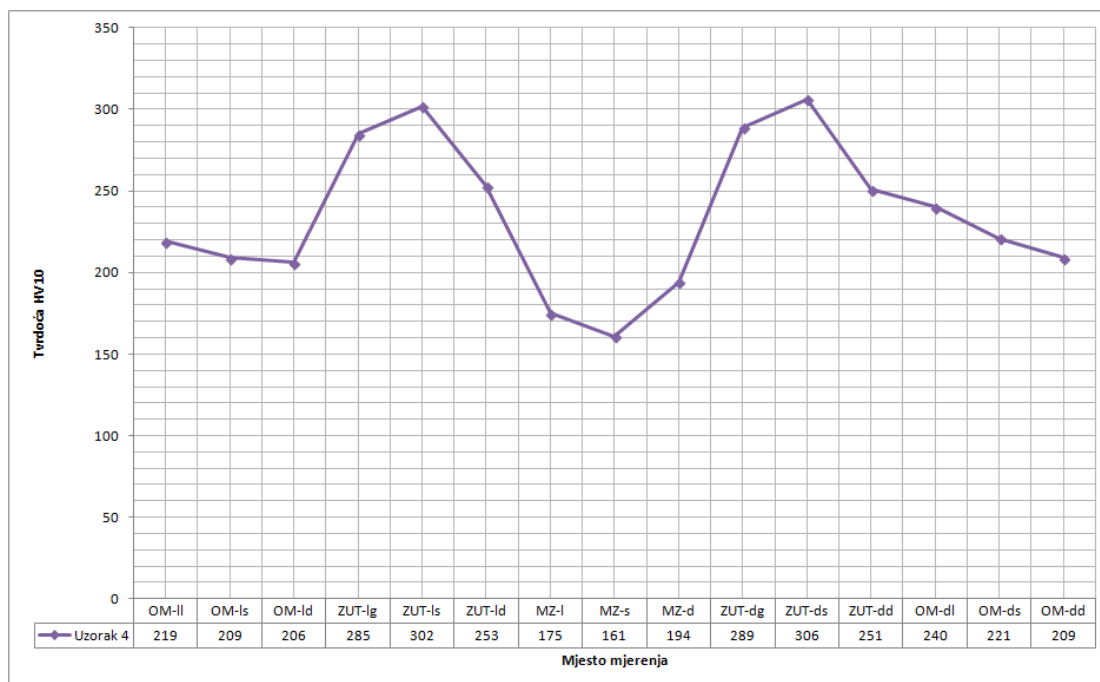
Slika 82. Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 2

Uzorak 2 zavaren je Lastek 1008 Ø3,2 elektrodom u 3 prolaza s prosječnim unosom topline od 9,45 kJ/cm. Cilj zavarivanja u više prolaza bio je testirati dali će se naknadnim prolazima uspjeti postići pogodnija mikrostruktura i bolja mehanička svojstva u odnosu na zavarivanje u jednom prolazu. Iz gornjeg dijagrama to nije moguće sa sigurnošću zaključiti. Tvrdoće metala zava ostale su približno iste kao i kod uzorka 1, dok izmjerene tvrdoće u području ZUT-a značajno variraju. Iz dijagrama se može vidjeti kako su izmjerene tvrdoće sa lijeve strane uzorka 2 značajno niže u odnosu na desnu stranu, te u odnosu na izmjerene tvrdoće na uzorku 1. Na slici 65. na kojoj je prikazan uzorak 2 neposredno nakon zavarivanja može se vidjeti kako treći prolaz nije bio postignut po sredini zava već više po rubu žlijeba. Ovo može biti dokaz da je doista na tom dijelu zava došlo do popuštanja donjeg sloja zava, ali potrebno je provesti detaljnija istraživanja sa više uzoraka kako bi se moglo doći do sigurnog zaključka. Ono što je najrelevantnije za ocjenu zavarljivosti te što se može dokazati iz gornjeg dijagrama jest da niti jedna vrijednost tvrdoća nije dosegla vrijednost od 375 HV10.



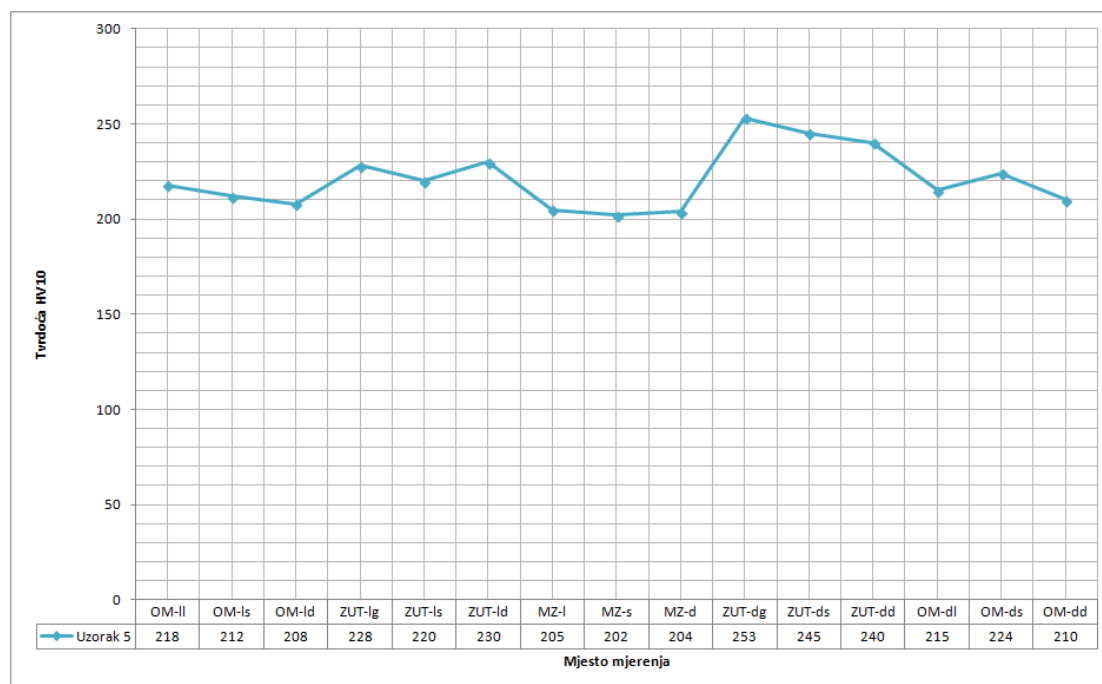
Slika 83. Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 3

Uzorak 3 zavaren je Lastek 1008 Ø4 elektrodom u jednom prolazu s unosom topline od 13,14 kJ/cm. U odnosu na uzorak 1 tvrdoće izmjerene u području metala zavara su nešto niže. Glavni uzrok tome jest duže hlađenje metala zavara uslijed većeg unosa topline. Sve izmjerene vrijednosti tvrdoća niže su od graničnih 375 HV10.



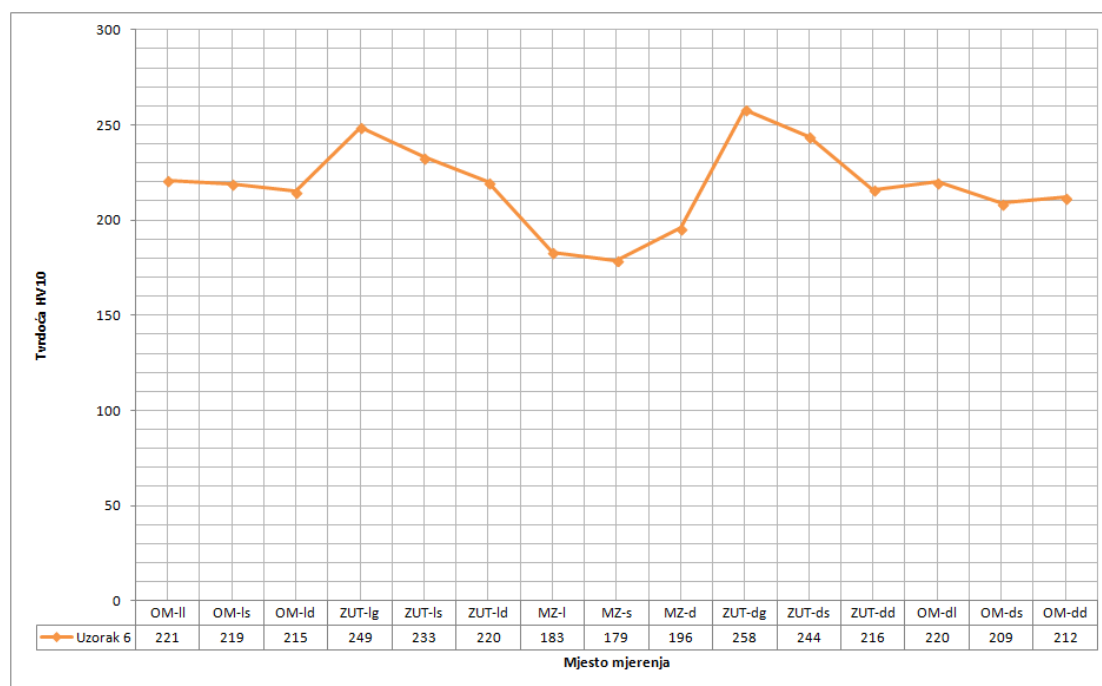
Slika 84. Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 4

Uzorak 4 zavaren je Lastek 1008 Ø4 elektrodom u 3 prolaza uz prosječan unos topline od 12,81 kJ/cm. Kod ovog uzorka kao i kod uzorka 2 najniže tvrdoće nalaze se u donjem dijelu ZUT-a pa se može pretpostaviti da je ipak naknadno toplinsko djelovanje na metal zavara postignut u 1. prolazu imalo utjecaja na mehanička svojstva i strukturu, no da bi se doista mogao ocijeniti taj utjecaj potrebno je provesti daljnja istraživanja. Sve izmjerene tvrdoće nalaze ispod granične vrijednosti od 375 HV10.



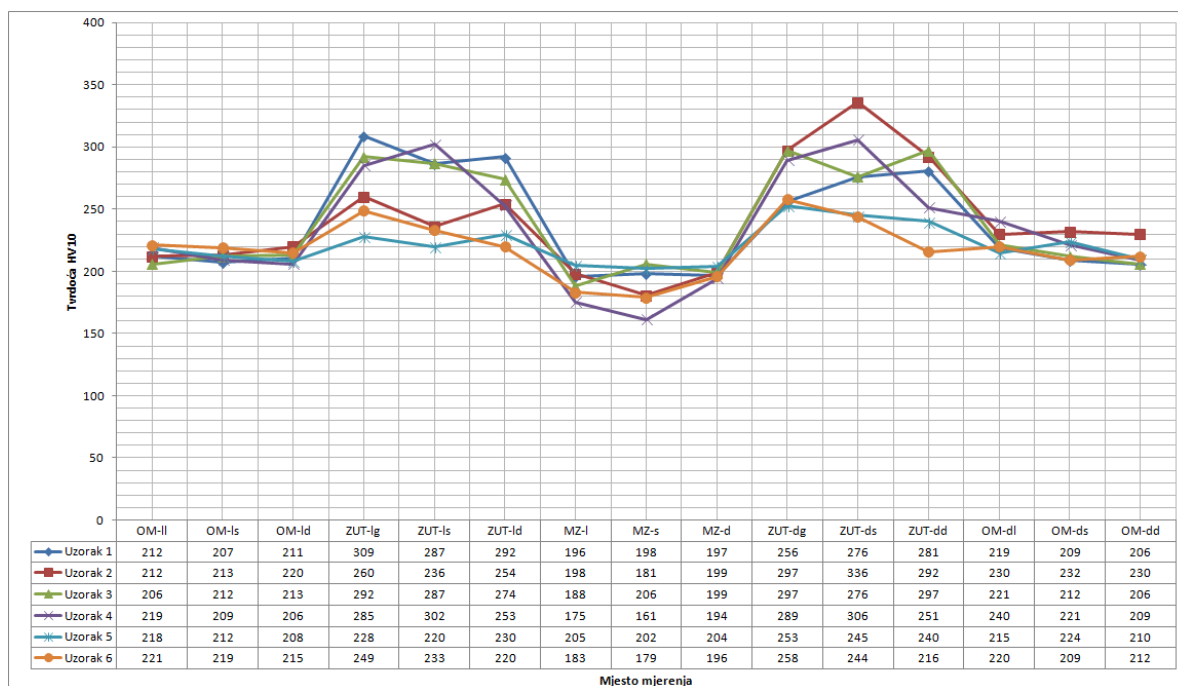
Slika 85. Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 5

Uzorak 5 zavaren je EZ 11-F Ø3,2 elektrodom u jednom prolazu i to u suhim (radioničkim) uvjetima zavarivanja. Kao što se može očekivati izmjerene tvrdoće su znatno niže od zavara postignutih u mokrim uvjetima zavarivanja uslijed sporijeg hlađenja uzorka nakon zavarivanja. Jednako se može zaključiti i za uzorak 6.



Slika 86. Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 6

Na slici 87. prikazana je usporedba izmjerenih tvrdoća svih uzoraka.



Slika 87. Usporedba izmjerenih tvrdoća svih uzoraka

Iz gornjeg dijagrama može se vidjeti kako su najviše vrijednosti tvrdoće izmjerene kod uzorka 1, zavarenog s unosom topline od 9,32 kJ/cm u jednom prolazu. Uzorak 2 koji je zavaren s približno jednakim unosom topline, ali u 3 prolaza, ima nešto nižu tvrdoću uslijed utjecaja

toplinske obrade zavarivanjem u više prolaza. Nadalje, uzorci 3 i 4, zavareni s prosječnim unosom topline od 13 kJ/cm imaju nešto niže tvrdoće od uzoraka 1 i 2 uslijed sporijeg hlađenja. Konačno, najniže tvrdoće izmjerene su na uzorcima 5 i 6, zavarenim u suhim uvjetima. Iz rezultata mjerenja tvrdoće da se zaključiti da je višim unosom topline te zavarivanjem u više prolaza moguće postići zavare sa nižim vrijednostima tvrdoće, odnosno povoljnijom mikrostrukturom.

5. ZAKLJUČAK

Potreba za primjenom čelika povišene i visoke čvrstoće za konstrukcije poput mostova, cjevovoda, nosača platformi, brodova te drugih priobalnih i odobalnih konstrukcija u stalnom je porastu. Glavni razlog tom trendu jest mogućnost smanjenja nosivih presjeka kod jednakih opterećenja, odnosno smanjenje mase i volumena konstrukcije čime se postižu niži ukupni troškovi. Povišenje čvrstoće kod čelika postiže se kombinacijom različitih mehanizama očvršćuća poput legiranja, plastične deformacije, toplinske obrade, itd. Poznato je da povišenjem udjela ugljika i legiranih elemenata pada zavarljivost materijala, te su potrebne posebne mjere poput predgrijavanja, naknadne toplinske obrade, ograničenog unosa topline i drugih mjera za postizanje zavarenih spojeva odgovarajuće kvalitete. Ako se zavarivanje odvija u ekstremnim uvjetima poput zavarivanja pod vodom, gdje dolazi do pojave ubrzanog hlađenja zavara te otvrdnuća mikrostrukture, visokog udjela difundiranog vodika u metalu zavara, pora, pukotina, uključaka troske te čitavog niza drugih problema, zavarljivost postaje upitna. Za procjenu zavarljivosti nekog materijala prije samog zavarivanja razvijene su mnoge analitičke metode, od kojih je najčešće korištena te opće prihvaćena metoda procjene prema ekvivalentu ugljika. Ova metoda uzima u obzir samo kemijski sastav osnovnog materijala, te prema njemu daje ocjenu zavarljivosti. Iako je ova metoda uspješno korištena u industriji, rezultati eksperimentalnog dijela ovog rada doveli su u pitanje njenu primjenjivost kod podvodnog zavarivanja čelika povišene čvrstoće. Rezultati analitičke procjene zavarljivosti prema izrazu navedenom u standardu za podvodno zavarivanje AWS D3.6M: 1999 pokazali su da nije moguće uspješno zavariti API 5L X80 pod vodom. Rezultati eksperimentalnog dijela pokazali su suprotno. Naime, u laboratorijskim uvjetima uspješno su dobiveni zavari klase B prema standardu AWS D3.6M. Niti na jednom od uzoraka zavarenih mokrim podvodnim REL-postupkom zavarivanja nije došlo do pojave hladnih pukotina, te su svi uzorci imali tvrdoće ispod 375 HV10, što predstavlja maksimalnu dopuštenu tvrdoću za zavare te klase. Ovi rezultati ukazuju na potrebu za prilagodbom postojećih metoda za procjenu zavarljivosti pri podvodnom zavarivanju ili za razvojem novih. Očito je kako zavarljivost visokočvrstih čelika poput API 5L X80 ne ovisi samo o njegovom kemijskom sastavu već i o termomehaničkim obradama kojima se postižu poboljšana mehanička svojstva, a pritom zadržava dobra zavarljivost. Tekken metoda korištena u ovom eksperimentu pokazala se primjenjivom metodom za procjenu zavarljivosti kod podvodnog zavarivanja. Treba napomenuti da su za Tekken ispitivanje uspješno zavareni sučeoni spojevi pod vodom,

koji se u praksi nikada ne koriste zbog svoje zahtjevnosti. Mogućnost dobivanja sučeonih zavarenih spojeva odgovarajuće kvalitete eksperimentalnim ispitivanjem garantira postizanje kutnih spojeva tražene kvalitete na istom osnovnom materijalu u praksi. S toga, Tekken metoda može se uspješno koristiti za procjenu zavarljivosti čelika visoke i povišene čvrstoće, međutim potrebno je uzeti u obzir specifičnosti mokrog podvodnog zavarivanja. Nadalje, rezultati eksperimentalnog dijela pokazali su da se zavarivanjem s većim unosom topline postižu bolja mikrostruktura zavara uslijed sporijeg hlađenja taline. Također, zavareni spojevi ostvareni u više prolaza imali su nešto niže tvrdoće od zavarenih spojeva ostvarenih u jednom prolazu. Da bi se točnije moglo procijeniti utjecaj zavarivanja u više prolaza potrebno je provesti daljnja istraživanja. Iako je REL zavarivanje danas najčešći postupak reparaturnog podvodnog zavarivanja u praksi, postoji veliki interes za daljnji razvoj podvodnog zavarivanja praškom punjenom žicom. Dobivanje kvalitetnih zavarenih spojeva na visokočvrstim čelicima poput API 5L X80 čelika u mokrim uvjetima moguće je postići mikrolegiranjem i smanjivanjem udjela kisika, za što je praškom punjena žica odlično rješenje. Idući korak razvoja mokrog podvodnog zavarivanja čelika povišene čvrstoće biti će sigurno povezan sa praškom punjenom žicom.

Ovaj rad na osnovu provedenih ispitivanja zavarenih spojeva dokazuje da je moguće uspješno zavariti mokrim podvodnim čelik API 5L X80 mokrim podvodnim zavarivanjem, pri čemu su zadovoljeni svi uvjeti B klase zavara prema normi AWS D3.6M:1999.

6. LITERATURA

- [1] F. Perez, S. Liu; Maintenance and Repair Welding in the Open Sea, Welding Journal, November 2005
- [2] <http://impactweather.com/offshoremarine/>, dostupno 13.05.2014
- [3] http://www.gowelding.org/images/Underwater_Welding.jpeg, dostupno 13.05.2014
- [4] Kralj S., Kožuh Z., Garašić I., Stanje i trendovi razvoja podvodnog zavarivanja i nerazornih ispitivanja, časopis Zavarivanje, br. 48, god. 2005., str. 153-165
- [5], Napredovanje hiperbaričkog podvodnog zavarivanja do velikih dubina kao rezultat razvoja off shore tehnologije, časopis Zavarivanje, br. 29, god. 1986, str. 287-295
- [6] Fostervoll H., Aune R., Berge J. O., Woodward N., Remotely Controlled Hyperbaric Welding of Subsea Pipelines, 6th Pipeline Technology Conference, 2011.
- [7] <http://www.statoil.com/en/technologyinnovation/fielddevelopment/>, dostupno 13.05.2014
- [8] Smojver A., Podvodno zavarivanje u otežanim uvjetima, Zavarivanje u pomorstvu, Haludovo 1998.
- [9], Undersea Welders Dive 230 Feet to Repair Pipeline, Welding Journal, March 1977, str. 38
- [10] Adrian F. Dier, Assesment of repair techniques for ageing or damaged structures, studeni 2004.
- [11] P. LeHardy, K. Elliot, Underwater Welding and Non-Destructive Testing in Support of U.S. Navy Ship Repair Operations, 15 September 2010
- [12] David J. Keats, Underwater Wet Welding: A Welder's Mate, TJ International, Padstow, Cornwall, 2011.
- [13] Garašić I., Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju, Doktorski rad, Zagreb 2008.
- [14] Garašić, Predavanja iz kolegija 'Postupci zavarivanja'

- [15] S. Ibarra, R.L. Reed, J.K. Smith, P.E. O'Connor, C. E. Grubbs, Underwater Wet-Welding Techniques for Repair of Higher-Carbon-Equivalent Steels, 22nd Annual Offshore Technology Conference, Texas, May 7-10, 1990.
- [16] S. Kralj, I. Garašić, Z. Kožuh, Podvodno mokro zavarivanje i podvodno ispitivanje u održavanju pomorskih objekata, FSB Zagreb, 2004.
- [17] http://www.millerwelds.com/pdf/spec_sheets/DC18-83.pdf , dostupno 13.05.2014
- [18] http://www.millerwelds.com/pdf/spec_sheets/ED10-8.pdf, dostupno 13.05.2014
- [19] Welding Handbook, The American Welding Society, Hialeah-Florida, 1998.
- [20], The flux-cored arc process for wet welding and cutting - an assesment; TWI Bulletin; May - June 1997
- [21], Power Sources for Underwater Arc Welding - Guidelines for the Specification of Requirements; SCUW 157-93
- [22] D. Chandiramani, Hydrogen reduced in wet underwater GMA welds, Welding Journal, pp 45-49, March 1994.
- [23] H. Haferkamp, F.W. Bach, J. H. Hamkens, Underwater wet welding of structural steels fot the off-shore sector using «self-shielded» flux-cored electrodes, Welding and Cutting, pp E71-E72, 5/1990
- [24] US patent 5236517A; Flux formulation for undewater wet flux-cored arc welding of nickel-based and austenitic stainless steels, 17. Kolovoz 1993.
- [25] P. Szelagowski, Wet welding as a 'serious' repair procedure?, ASME, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 120, August 1998
- [26] Garašić I. Predavanja iz kolegija 'Zavarljivost materijala'
- [27] S. Kralj, Z. Kožuh, I. Garašić, L. Dorn, Influence of the water enviroment on the parameters in underwater wet welding, Welding and Cutting, Vol. 55, No.2, pp 97-99, 2003
- [28] I. Garašić; Postupci zavarivanja, Mokro podvodno zavarivanje, prezentacija

- [29] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof, Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu; Zagreb, 2007
- [30] S. Kralj, B. Radošević, I. Garašić, Zavarivanje cjevovoda od čelika API 5L X70, časopis Zavarivanje, 2008. br. 3-4, Zagreb
- [31] D. Fydrych, J. Labanowski, G. Rogalski, Weldability of high strength steels in wet welding conditions, Polish Maritime Research, No2/2013
- [32] D. Fydych, G. Rogalski, Effect of shielded-electrode wet welding conditions on diffusion hydrogen content in deposited metal, Welding International Vol. 25, March 2011
- [33] S. Kralj, I. Garašić, Z. Kožuh; Diffusible hydrogen in underwater wet welding, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb
- [34] Kralj S., Sikirić V, Zavarljivost visokočvrstih čelika, Zavarivanje 45 (2002), 3/4, 91-96
- [34] API 5L Specification for Line Pipe
- [36] AWS D3.6M: 1999 Specification for Underwater Welding
- [37] Mikulić I., Mokro podvodno zavarivanje čelika API 5L X80 REL-postupkom zavarivanja, Završni rad, Zagreb, 2012
- [38] A. Čorić, K. Grubić, I. Samardžić, Ispitivanja sklonosti zavarenih spojeva čelika 1534 VP prema nastajanju hladnih pukotina, Zavarivanje 3/4, 2008
- [39] J. Cwiek, Hydrogen assisted cracking of high-strength weldable steels in sea-water, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 164-165, pp 1007-1013, 2005
- [40] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/greske.pdf>, dostupno 13.05.2014
- [41] Hrivnjak I., Zavarljivost čelika, Beograd, 1982
- [42] Katalog proizvođača Lastek
- [43] Katalog proizvođača Elektroda Zagreb
- [44] Atest materijala za šaržu čelika API 5L X80